

工學博士 學位論文

지역난방 열배관의 온도거동 특성 및 회수온도
변화에 따른 안전성 연구

A Study on Characteristic of Temperature Behavior and Safety
by Change of Return Temperature of District Heating Pipe



2012年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

安 龍 模

本 論文을 安龍模의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 孔 炳 承 (印)

委 員 工學博士 李 熙 賢 (印)

委 員 工學博士 金 度 三 (印)

委 員 工學博士 金 泰 亨 (印)

委 員 工學博士 慶 甲 秀 (印)

2011 年 12月 20日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

목 차

목 차	i
표목차	iii
그림목차	iv
ABSTRACT	v
요 약	vii
1장 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	2
1.2 기존연구의 동향	5
1.3 연구내용 및 범위	9
2장 관련 연구내용 검토	10
2.1 열공급시설 설계기준	11
2.2 열수송시설 설계기준	12
2.2.1 이중보온관의 구조	12
2.2.2 매설 열배관의 특성과 이론	14
2.2.3 열배관 설계	15
2.3 피로안전성 평가방법	19
2.3.1 피로안전성 평가 개요	19
2.3.2 사이클기반 평가법	21
2.3.3 응력기반 평가법	23
2.4 소결	26
3장 지역난방 열배관 거동에 관한 실측조사	27
3.1 열배관 온도측정에 관한 선행연구	28
3.2 온도측정데이터 특성 분석	35
3.3 소결	39

4장 피로안전성 평가	40
4.1 지역난방 열배관 온도이력의 Rainflow Counting 계수	41
4.2 사이클기반 피로안전성 평가	45
4.3 응력기반 피로안전성 평가	49
4.3.1 이론식에 의한 평가법	49
4.3.2 유한요소해석에 의한 평가법	50
4.4 소결	55
5장 열배관 부속설비(Fitting류)의 영향	56
5.1 개요	57
5.2 Elbow형 열배관에 대한 응력기반평가	57
5.3 Tee형 열배관에 대한 응력기반평가	61
5.4 소결	65
6장 회수온도 변화에 따른 열배관의 안전성 평가	66
6.1 개요	67
6.2 회수온도 변화에 따른 활동길이 및 신축량 검토	67
6.3 회수온도 변화에 따른 안전성	71
6.4 소결	73
7장 결론	74
7.1 결론	75
7.2 향후 과제	76
참고문헌	77
부 록	80

표목차

표 1-1 전국 지역별 지역난방 공급현황(2010년 말)	3
표 1-2 열배관 설치온도 기준	4
표 2-1 내관 재질	13
표 2-2 강관 재질별 허용축응력 기준	13
표 2-3 열팽창력 제어방법	14
표 2-4 열배관의 예열유무에 따른 열응력	16
표 2-5 한계상태 조사방법에 따른 열배관의 상세	20
표 2-6 열배관의 상세에 따른 한계상태 조사방법	21
표 2-7 사이클기반 평가기준(내구연한 30년 기준)	22
표 3-1 온도측정데이터의 위치 및 특성	36
표 4-1 사이클계수 결과 일례 (H아파트)	42
표 4-2 등가전온도사이클수 계산결과의 일례 (E아파트)	45
표 4-3 등가전온도사이클수 계산결과의 일례 (H아파트)	46
표 4-4 등가전온도사이클수에 의한 사용자배관의 피로안전성 평가결과	48
표 4-5 이론식에 의한 누적손상계수 계산결과 일례 (H아파트,30년)	49
표 4-6 이론식에 의한 응력기반 피로안전성 평가결과	50
표 4-7 해석모델 제원	51
표 4-8 유한요소해석을 이용한 응력기반 누적손상도 평가결과 (30년)	54
표 5-1 Elbow형 열배관의 제원 일례	57
표 5-2 Elbow형 열배관의 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 평가결과 ...	60
표 5-3 Tee형 열배관의 제원	61
표 5-4 Tee형 열배관의 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 평가결과	64
표 6-1 관경별 활동길이 및 신축량 비교 (강종 : SPPS 370)	67
표 6-2 관경별 활동길이 및 신축량 적용기준	69
표 6-3 회수온도 변화시 관경별 활동길이 및 신축량 비교	70
표 6-4 회수온도 변화에 따른 열응력 해석결과 (65A-50A)	71

그림목차

그림 2-1 지역난방 설계온도	11
그림 2-2 이중보온관의 구조	12
그림 2-3 배관에 작용하는 작용력	15
그림 2-4 온도에 따른 고정구간의 축응력 변화의 개념	16
그림 2-5 매설 열배관의 온도증가시 거동	17
그림 2-6 강재 열배관에서의 한계상태의 조사방법	19
그림 2-7 온도에 따른 열배관의 탄성계수 및 열팽창계수 (ASTM기준)	24
그림 2-8 피로수명예측에 사용된 S-N곡선	25
그림 3-1 열배관의 온도측정위치	28
그림 3-2 온도측정데이터의 일례 (1995년)	30
그림 3-3 온도측정데이터의 일례 (1997년)	32
그림 3-4 온도측정데이터의 일례 (2004년)	34
그림 3-5 온도데이터 측정대상 지역 (A지구)	35
그림 3-6 공급관 및 회수관 측정개요의 일례 (E아파트)	36
그림 3-7 공급관 및 회수관의 1년 측정 온도그래프 (E아파트)	37
그림 3-8 공급관 및 회수관의 1년 측정 온도그래프 (H아파트)	38
그림 4-1 측정온도범위에 대한 히스토그램의 일례 (H아파트)	43
그림 4-2 측정온도범위에 대한 빈도그래프의 일례 (H아파트)	44
그림 4-3 E아파트의 온도범위에 대한 등가전온도사이클수	47
그림 4-4 해석모델 형상	51
그림 4-5 열전달해석 결과 일례 (65A)	52
그림 4-6 열응력해석 결과 일례 (65A)	53
그림 5-1 해석모델 형상	58
그림 5-2 열응력해석 결과 일례 (65A)	59
그림 5-3 해석모델 형상 일례 (65A-50A)	62
그림 5-4 열응력해석 결과 일례 (65A-50A)	63
그림 6-1 매설 열배관의 온도증가시 거동	68
그림 6-2 회수온도 변화에 따른 열응력 분포 일례 (65A-50A)	72

A Study on Characteristic of Temperature Behavior and Safety by Change of Return Temperature of District Heating Pipe

by
An, Yong-Mo

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

ABSTRACT

District heating pipe, which is responsible for heat energy transmission, will be under the thermal stress with temperature variances in heating water, it suffers from the fatigue phenomenon caused by the thermal stress according to an increase in the number of its service year and cycle. Therefore, if any unforeseen district heating pipes fatigue damage happens, it will be the interruption of supply to end-users, district heating could have a negative impact such as economic loss, social image crashed as well.

District heating pipe which is installed for the purpose of heating supply has set up a public purpose for improving the efficiency and economic conditions of district heating. In addition, district heating demand is increasing due to expansion of district heating and increased thermal energy usage, so various measures for increase of supply will be taken. One of these measures which makes increase of the heat capacity due to return temperature drops is being considered as a viable plan.

In this study, for the purpose of evaluation of fatigue life influence of district heating pipe, metered on-site temperature history data were analyzed. In addition, based on analysis, the fatigue safety of district heating pipes was evaluated via cycle-based evaluation and stress-based evaluation and evaluated the safety of district heating pipe due to return temperature drop.

From the study, as the result of analysis on end-user pipe temperature data, according to the characteristics of the target area using the district heating pipe, the distribution pipe temperature characteristics managed by KDHC and end-user pipe characteristics were reflected well. Also, in target area, suspension did not show in summer period but in some measured data, temperature stress fatigue were researched to require review because the impact of the environment with large temperature variations appear periodically.

In addition, as the result of cycle-based fatigue safety evaluation for end user pipe of the target area based the number of equivalent full temperature cycle, IEA open standards 30 years duration showed that meet the criteria. Based on the theory and finite element analysis, stress-based fatigue safety evaluation results, the cumulative damage factor value was less than 1.0. in target area. From this assessment, on stress-based fatigue evaluation, district heating pipes ensured the fatigue safety.

For the Elbow type and Tee type heating pipe, on the mean temperature as a parameter, the finite element analysis carried out in accordance with the geometry of the pipe and calculated the range of thermal stress, thermal stress of the pipe geometry were analyzed depending on geometry of the pipe.

From analysis, for the same mean stress and temperature variations, Tee range of the thermal stress was largely than Elbow. In addition, in the same Tee, the larger the change in geometry, thermal stress range appeared significantly.

To identify the return pipe temperature limits, as the result of study on friction length, expansion length and allowable stress of district heating pipe, in case of return temperature 40 °C to the reference temperature, a return temperature of the existing pipe to meet allowable stress so return temperature have recovered reasonably determined that the temperature is 40 °C.

지역난방 열배관의 온도거동 특성 및 회수온도 변화에 따른 안전성 연구

안 용 모

한국해양대학교 대학원
토목환경공학과

요 약

지역난방을 담당하는 열수송 배관은 난방수의 온도변화에 따른 열응력을 받게 되며, 이러한 열응력은 공용년수의 증가에 따라 지속적으로 반복횟수가 증가되어 열응력에 의한 피로현상이 발생한다. 따라서 열배관에 예측하지 못한 열피로파손이 발생하게 되는 경우 최종 사용자에게 난방수 공급의 중단이라는 피해를 주게 되며, 또한 지역난방에 대한 사회적 이미지 추락 및 경제적 손실 등과 같은 부정적 영향을 끼칠 수 있다.

지역난방 공급을 목적으로 설치된 열배관은 지역난방의 효율성 향상에 의한 경제성 향상 등을 목적으로 공용조건을 설정하고 있다. 또한 지역난방의 확대보급 및 수요증가로 인하여 열수요가 증가하고 있으므로 현재 공용중인 열배관의 열공급량 증대를 위해 다양한 대책이 강구되고 있다. 이러한 방안의 하나로 회수온도 하강에 의한 열용량 확보가 유력한 방안으로 검토되고 있다.

본 연구에서는 지역난방수 온도변화가 지역난방 열배관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위해 공용중인 열배관에 대한 현장계측 된 온도이력데이터를 분석하였다. 또한 분석자료를 기초로 기존 열배관에 대한 사이클기반 피로평가법 및 응력기반 피로평가법에 의한 열배관의 피로안전성을 평가하였으며, 회수온도 변화에 따른 기존 열배관의 안전성 평가를 실시하였다.

이상의 연구로부터 사용자 배관을 대상으로 1년간의 온도측정 데이터를 분석한 결과, 측정 대상지역의 열배관 사용 특성에 따라 지역난방공사에서 관리하는 분배관의 온도 특성 및 사용자 배관의 사용특성 등이 반영되고 있는 것으로 나타났다. 또한 연구대상 계측장소에서는 하절기에 휴지기 현상은 나타나지 않았으나, 일부 측정데이터의 경우에는 사용환경의 영향으로 큰 온도변화가 주기적으로 나타나 온도응력에 의한 피로검토가 필요한 것으로 조사되었다.

또한, 전체 측정대상지역에 대한 등가전온도사이클수에 기초한 모든 사용자배관에 대한 사이클기반 피로안전성 평가 결과, IEA(International Energy Agency,국제에너지기구) 내구연한 30년 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 이론식 및 유한요소해석에 기초한 응력기반 피로안전성 평가 결과, 평가 대상위치의 모든 열배관에 대한 누적손상도는 대상 열배관에 대해 모두 1.0이하의 값으로 나타났다. 이로부터 응력기반에 의한 평가에서도 대상열배관은 모두 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

Elbow형과 Tee형 열배관을 대상으로 평균온도별 온도변화를 매개변수로 하여 유한요소해석을 실시하여 배관의 기하형상에 따른 열응력범위를 산출하여 배관의 기하형상에 따른 열응력을 분석하였다. 해석결과, 동일한 평균응력 및 온도변화에 대해서는 Elbow형 열배관에 비하여 Tee형 열배관의 열응력범위가 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 Tee형 열배관에서도 기하형상의 변화가 클수록 열응력범위가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

그리고 열배관의 회수온도 한계규명을 위해 활동길이, 신축량 및 허용응력 검토 결과, 기준온도에 대한 회수온도 40℃의 경우 기존 열배관의 허용응력을 만족하는 것으로 나타나 회수온도는 40℃가 타당한 것으로 판단되었다.



1장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

1.2 기존연구동향

1.3 연구내용 및 범위



1장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

지역난방 및 냉방시스템(district heating and cooling system)은 많은 국가에서 온실효과(greenhouse effect) 및 에너지 사용으로 발생하는 오염원을 감소시키는데 상당한 공헌을 해오고 있다. 또한 에너지의 효율적 사용과 절약이라는 측면에서도 지역난방에 대한 사회적 수요가 증대되고 있으며, 이와 더불어 지역난방 시스템을 구성하는 설비의 복잡화 및 전문화로 인해 설비 고유의 기능을 유지하기 위한 보전비용(maintenance cost)이 증가하고 있는 추세이다.

이에 우리나라는 1985년 11월 “주거 및 상업지역 등에 대한 집단에너지 공급의 효율적 수행을 통해 기후변화협약에 능동적으로 대응하고 에너지 절약 및 국민생활의 편의 증진”의 목적으로 한국지역난방공사가 설립되었으며, 2011년 현재 전국적으로 약 115만호에 집단에너지 공급을 실시하고 있다. 또한 한국지역난방공사를 포함한 우리나라 총 26개 집단에너지사업자가 201만호(2010년 말)에 공급 중이며, 2013년 까지 총 주택의 16.3%인 254만호에 공급계획(제3차 집단에너지공급 기본계획, 2009.11)을 가지고 있다. 이러한 지역난방사업으로 인한 효과는 다음과 같으며, 표 1-1에 전국 지역별 지역난방 공급현황(2010년 말)을 나타내고 있다.

- 1) 열병합발전에 의한 에너지 이용효율 향상 (49.9%→80.7%) 등으로 에너지 절약



- 2) 원천적인 에너지 절감과 고효율 오염방지설비로 대기오염물질 배출량 감소 (에너지절감 약 22%, 대기오염물질 약 24% 및 온실가스 약 38% 감축)
- 3) 쾌적하고 안전한 주거환경 조성 및 국민생활 안정에 기여
- 4) 지역냉방 공급으로 하절기 전력 첨두부하 완화 및 수요지 인근 위치에 따른 송전 손실 감소
- 5) 연료원 다원화(쓰레기 소각열, 매립가스(LFG), 우드칩, 쓰레기고형연료(RDF), 산업공정 폐열 등)로 석유 의존도 감소 및 미활용에너지 활용 증대

표 1-1 전국 지역별 지역난방 공급현황(2010년 말)

(단위 : 호)

구분	한국지역난방공사	기타 사업자	공급 계
서울	260,023	247,138	507,161
인천	-	80,812	80,812
경기	672,491	398,878	1,071,369
수도권 계	932,514	726,828	1,659,342
부산	-	44,514	44,514
대구	101,712	4,816	106,528
대전	-	41,751	41,751
광주	-	20,158	20,158
울산	-	-	-
강원	-	-	-
충북	69,164	-	69,164
충남	-	9,323	9,323
전북	-	4,655	4,655
전남	-	-	-
경북	-	5,198	5,198
경남	44,842	-	44,842
제주	-	-	-
비수도권 계	215,718	130,415	346,133
합 계	1,148,232	857,243	2,005,475

지역난방시스템의 주요 기기중 하나인 열배관은 크게 공급관(supply pipe)과 회수관(return pipe)으로 구분할 수 있다. 주배관(main pipe)에서 시작되는 난방수는 100℃ 내외의 온도와 0.1MPa(10kg/cm²) 내외의 압력을 받는 상태에서 주배관 및 분배관의 공급관을 거쳐 열교환기에서 열을 공급하고, 다시 회수관을 통하여 회수되는데, 열은 열교환기에서 사용자 배관을 통하여 각 지역별 최종 사용자에게 공급된다. 이와 같이 중소규모 도시의 지역난방을 담당하는 열수송 배관은 난방수의 온도변화에 따른 열응력을 받게 되며, 이러한 열응력은 공용년수의 증가에 따라 지속적으로 반복회수가 증가되어 열응력에 의한 피로현상이 발생한다. 그러므로 만약 열배관의 예측하지 못한

열피로파손이 발생하게 되는 경우 최종 사용자에게 난방수 공급의 중단이라는 피해를 주게 되며, 또한 지역난방에 대한 사회적 이미지 추락 및 경제적 손실 등과 같은 부정적 영향을 끼칠 수 있다.

열공급규정(한국지역난방공사, 2008)에 의하면 지역난방 열배관은 지역난방의 효율성 향상 및 경제성 향상 등을 목적으로 열배관의 사용조건을 제시하고 있다. 표 1-2에 나타난 열배관 설치온도 기준과 같이 2003년도 이전에는 예열온도 80℃를 기준하여 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 열배관 온도범위가 120℃~40℃에서 거동하도록 하였으며, 2003년 이후에는 전기예열 도입과 함께 예열온도 65℃를 기준으로 $\Delta T=55^{\circ}\text{C}$ 를 설정하여 열배관 온도범위가 120℃~10℃에서 거동하도록 하여 열효율 등의 향상을 도모하고 있다.

표 1-2 열배관 설치온도 기준

구 분	예 열 온 도	온 도 범 위	ΔT	재 열 여 부
2003년 이전	80℃	120℃~40℃	40℃	필 요
2003년 이후	65℃	120℃~10℃	55℃	불필요

한편 지역난방의 확대보급 및 수요증가로 인하여 열수요가 증가하고 있으므로 현재 공용중인 열배관의 열공급량 증대를 위해 다양한 대책이 강구되고 있다. 이러한 방안의 하나로 회수온도 하강에 의한 열용량 확보가 유력한 방안으로 검토되고 있다.

따라서 본 연구에서는 지역난방수 온도변화가 지역난방 열배관 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위해 공용중인 열배관에 대한 현장계측 된 온도이력데이터를 분석하였다. 또한 분석자료를 기초로 기존 열배관에 대한 사이클기반 피로평가법 및 응력기반 피로평가법에 의한 열배관 피로안전성을 평가하였으며, 회수온도 변화에 따른 기존 열배관의 안전성 평가를 실시하였다.

1.2 기존연구의 동향

지역난방 열배관에 대한 연구는 국내의 경우 한국지역난방공사를 중심으로 제한적으로 실시되어지고 있다.

주병기 등(2003)의 “열배관 신축에 따른 응력해소방안 및 특수구간 시공법 개선 연구”에서는 열배관 열팽창 처리 및 폼패드 설계기준 개선을 위하여 온도변화의 시공기준에 따른 배관응력 검토, 신축밴드부에서의 폼패드 설계기준 및 곡관부의 필요성에 대해 검토하여 다음과 같은 결과를 제시 하였다.

- 가) 강관의 최대온도를 120℃로 사용하는 조건에서 시공시 예열온도가 80℃에서 65℃로의 예열조건 변화, 즉 온도변화범위(ΔT)가 40℃에서 55℃로 변화하는 조건에서 지하에 매설된 열배관의 활동길이는 기존의 약 2배이며, 말단의 신축량은 대구경 배관의 경우 약 30% 증가한다.
- 나) 국내에서 사용되는 100mm 두께의 폼패드로 흡수할 수 있는 축방향 신축량은 밴드의 형태에 따라 변화하는데, L자형 밴드는 50mm, Z 및 U자형 밴드는 70mm인 것으로 조사되었다.
- 다) 열배관의 폼패드의 최대두께는 100mm로 제한되므로 열팽창이 과다하여 폼패드로 팽창을 흡수 할 수 없는 경우, 곡관부에 공동구를 설치하는 것을 제안한다.

정광섭 등(2006)의 “지역난방 사용자 열사용 실태 분석에 관한 연구”에서는 사용자 배관을 급탕부하와 난방부하로 나누어 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 40평형대 단위면적당 부하분석, 30평형대 단위면적당 부하분석, 20평형대 단위면적당 부하분석, 평형대별 열사용량 비교, 외기온도와 단위면적당 부하 상관성 분석을 실시하여 검토하고 다음과 같은 결과를 제시 하였다.

- 가) 면적당 급탕부하는 동절기가 하절기보다 크게 나타났는데, 하절기에 비해 40평형대, 30평형대, 20평형대에서 각각 2.9배정도, 2.4배정도, 3.3배정도로 나타났다. 또한 연간 시간대별 단위면적당 평균급탕부하 중 피크가 발생한 2시간은 40평형대, 30평형대, 20평형대에서 각각 전체의 9.33%, 12.14%, 13.21%를 차지하였다. 그리고 사용자측 연평균 급탕 공급온도는 47℃~49℃, 회수온도는 45℃~46℃, 온도차이는 2℃정도, 평균시수온도는 15℃로 조사되었으며, 외기온도와 단위면적당 급탕부하는 상관성이 적은 것으로 나타났다.
- 나) 면적당 난방부하는 동절기가 하절기보다 크게 나타났는데, 하절기에 비해 40평형대, 30평형대, 20평형대에서 각각 34.9배, 29.9배, 28.7배로 나타났다. 또한 연간 시간대별 단위면적당 평균난방부하 중 피크가 발생한 2시간은 40평형대, 30평형대,

20평형대에서 각각 전체의 11.03%, 10.81%, 11.82%를 차지하였다. 그리고 사용자 측 연평균 난방 공급온도는 41℃~47℃, 회수온도는 36℃~46℃, 온도차이는 2℃~10℃정도로 조사되었으며, 외기온도와 단위면적당 난방부하의 상관성이 적은 것으로 나타났다.

현경수 등(2008)의 “효율적 열사용 및 수요개발능력 제고를 위한 차온증대방안 연구”에서는 기존 지역의 차온(공급 및 회수 온도 차이)를 개선하여 추가 냉·난방 수요에 대하여 열공급이 가능하도록 분야별로 차온증대 방안을 연구하고, 차온개선 효과를 실증하기 위한 일련의 연구를 실시하였다. 이 연구에서는 차온증대방안으로 열생산시설, 열수송시설, 열사용시설에 대해 분야별로 차온증대방안을 검토하여 다음과 같은 결과를 제시 하였다.

- 가) 하절기 지역난방수 설계조건인 공급 85℃, 회수 50℃를 동절기 조건인 공급 100℃, 회수 65℃로 운전하여 지역난방 공급온도를 높일 경우 발전량은 감소하고, 열생산량이 증가할 것으로 예상된다. 이는 증기터빈을 이용하는 지역난방은 전력생산을 위해 증기터빈을 거쳐 나온 배기를 이용하여 가열하고 있으며, 지역난방수 온도가 낮아지면 증기터빈 응축온도가 낮아지고 배압이 낮아져 발전량이 증가하기 때문이다.
- 나) 지역난방 사용자 설비중 급탕설비는 하절기 기준인 지역난방 공급온도 75℃, 회수 온도 35℃로 설계되어 있어, 지역난방 공급온도를 75℃로 공급하여도 사용자 설비 운영에 문제가 발생되지 않는다.
- 다) 동절기인 지역난방 공급온도 115℃, 회수온도 50℃는 사용자 설비의 차온개선에 효과적인 설계기준임을 실증시험을 통해 확인하였다. 또한 공급온도를 기존의 120℃를 유지하면서 최적의 운전상태로 관리되도록 한다면 회수온도는 40℃까지 낮출 수 있어 효과적인 차온관리가 가능할 것으로 판단된다.

그러나 이상의 지역난방에서 실시한 연구에서는 각각 예열변화에 따른 열배관응력의 검토, 사용자 배관측의 급탕부 및 난방부의 사용 특성, 열배관의 차온특성에 따른 열배관운영 등에 대한 연구를 수행하였으나, 이들 예열온도 변화가 지역난방 열배관의 공용특성과 이로 인한 열배관의 피로안전성 평가 등에 대해서는 연구가 실시되지 않은 것으로 조사되었다.

한편, 김정구 등(2002)은 열배관 부식피로균열에 관한 연구에서 열배관용 아크용접 탄소강 SPW 400의 부식피로 수명을 인장시험, 분극시험, 피로시험, 부식피로시험, 온도측정, 응력해석 등으로 평가하여 다음과 같은 결론을 제시하였다.

- 가) 열배관 용접부의 피로 및 부식피로 시험을 통해 S-N 곡선을 구하였으며, 이를 수

명 예측에 활용하였다. 또한 부식피로 하에서의 부식속도 측정을 통하여 부식과 반복응력이 동시에 작용하는 경우의 부식속도의 변화를 평가한 결과, 대기 중에서 열배관은 일반 탄소강의 피로 거동과 유사한 결과를 나타내었으며, 인장강도의 60% 정도의 응력에서 무한 수명을 나타내었다.

나) 열배관의 부식피로 수명예측은 Palmgren-Miner 법칙을 이용하였으며, 주배관, 분배관, 단지내 배관에 대해 30년 동안의 수명예측을 한 결과, 모든 경우에 대해 30년 설계 수명이 보장되었으며, 이러한 결과는 30년 동안의 응력이 작용하더라도 강관의 수명에는 영향이 없음을 의미한다. 즉, 보온재의 열화 등으로 보온재가 손상을 받은 경우에도 열배관 보온성은 떨어질 수 있으나, 열배관 강관에는 큰 영향을 주지 않으며, 매설 초기 발생하는 최대 응력도 'pre-stressing' 효과로 인해 강관의 수명에 영향을 주지 않는다. 그러나 본 수명예측은 열배관을 구성하는 강관에 한해 국한된 것이다. 실제로 열배관의 기능을 고려한 입장에서의 수명은 보온재가 더 큰 기여를 한다는 독일의 연구결과가 최근에 발표되어, 국내에서도 강관의 수명에 이어 보온재의 수명에 대한 연구가 향후 이루어져야 할 것으로 사료된다.

다) 예열 기준의 변경에 따라 초기 예열값이 80℃에서 60℃로 변화되면, 모든 조건에서 응력이 상승된다. 그러나 가장 가혹한 조건인 분기관(Tee) 용접부에 대한 수명예측 결과, ΔT 60℃가 매설 초기에 발생하고 전반적인 응력의 상승이 동반되더라도, 열배관의 30년 설계수명에는 문제가 없는 것을 알 수 있었다. 그러나 분기관 용접부의 경우에는 ΔT 36℃ 이상에서 항복응력을 초과하는 응력이 유발되므로, 이 부분에 대해서는 지속적인 보수와 관리가 필요하다.

라) 현재 열배관에 적용중인 SPW 400과 SPPS 370은 이 연구 결과 30년 동안 부식피로 분위기에 노출되더라도 설계수명을 보장한다. 따라서 연구 초기에 검토하고자 한 새로운 강관으로의 변경은 고려되지 않아도 열배관의 설치 및 운영에 하자가 없을 것으로 사료된다. 이 연구의 결과, 열배관의 부식피로 분위기에서 수명에 영향이 없다고 확인되었으나, 실제 현장에서는 부식으로 인한 보수가 발생하고 있는 상태이다. 이러한 문제는 일부 지역에서의 국부 부식은 재료의 결함, 시공시 하자 등과 같은 인자에 의해 좌우되기 때문에 사전 예측이 매우 힘들다. 따라서 국부 부식에 의한 열배관의 손상은 이 연구 결과에서 고려하지 않은 부분이므로 향후 연구 및 보완이 필요할 것이다. 당초 열배관의 부식방지를 위한 방법으로 거론되었던 음극방식법은 열배관 전체에 적용하기보다는 일부 가혹한 환경조건에서만 부분적으로 설치하는 것이 합리적이라 생각된다. 즉, 부식에 의해 보수가 발생한 부분의 재료 및 환경적인 공통점을 찾아내어, 이와 유사한 환경과 재료 조합이 발생하는 부분에 대해 부분적인 음극방식법을 적용하는 것이 열배관의 수명연장을 위해 도움이 될 것으로 생각된다.

또한, 김영진 등(2004), 장윤석 등(2005)은 지역난방용 열배관에 흐르는 난방수의 온도변화가 강관의 피로수명에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 10개 지점에서 측

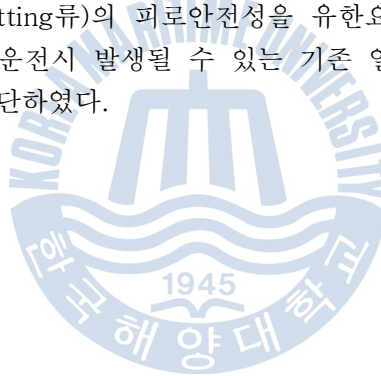
정한 온도 데이터를 분석하여 기초 자료로 사용하고, 활용 가능한 다수의 예측기법을 적용하여 열배관의 피로수명을 정량적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 제시하였다.

가) 피로손상 측면에서 주배관과 사용자 연결구간의 큰 차이점은 없었다. 또한 휴지기 유무에 따른 영향은 열배관 유형 및 평균온도 차이의 영향에 비해 크지만, 피로수명은 온도차이에 의해 가장 크게 좌우되는 것으로 판단된다.

나) 모든 열배관에 대한 사이클기반 및 응력기반 피로수명 평가결과는 30년 설계조건을 충족하였으나, IEA(International Energy Agency, 국제에너지기구)의 사이클기반 평가법은 간편한 대신 지나치게 보수적인 것으로 판단된다.

그러나 위의 연구에서는 지역난방 열배관의 피로 및 부식피로 특성과 설계수명 평가, 그리고 열배관에 대해 측정된 온도데이터를 이용하여 열배관의 피로안전성을 평가하였으나, 공용회수온도 변화 및 온도변화에 따른 열배관의 피로특성에 미치는 연구는 실시하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 최근 운전온도 데이터를 이용하여 열배관은 물론 상대적으로 취약한 열배관 부속설비(Fitting류)의 피로안전성을 유한요소 해석을 병행하여 평가하고, 열배관 회수온도 하강 운전시 발생될 수 있는 기존 열배관의 안전성을 평가 연구하는 것이 바람직하다고 판단하였다.



1.3 연구내용 및 범위

본 연구에서는 지역난방 열배관의 온도거동 특성 및 회수온도 변화에 따른 기존 열배관의 안전성 평가를 규명하기 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다.

본 논문은 총 7장으로 구성되며, 각 장의 주요내용은 다음과 같다.

제 1장에서는 본 연구의 배경 및 목적, 기존연구의 동향, 본 연구의 내용 및 범위에 대해 기술하였다.

제 2장에서는 지역난방 열배관의 형태, 구조, 재료적 성질 및 매설열배관의 이론과 같은 관련 기본 내용 및 본 연구에서 적용한 사이클기반 평가법 및 응력기반 평가법과 같은 피로안전성 평가방법에 대해 기술하였다.

제 3장에서는 지역난방 열배관의 온도측정데이터를 수집하고 온도측정데이터의 특성을 분석하였다.

제 4장에서는 2장에서 제시한 사이클기반 평가법 및 응력기반 평가법을 적용하여 실험데이터를 기초로 하여 기존 열배관의 피로안전성 평가를 실시하였다.

제 5장에서는 열배관의 기하형상에 따른 Elbow형 및 Tee형의 Fitting류에 대한 피로안전성 평가를 실시하였다.

제 6장에서는 지역난방 열공급량 증대를 위한 방안의 하나로 검토되고 있는 회수온도 하강운전 시행 시 발생 될 수 있는 기존 열배관의 안전성 평가를 실시하였다.

제 7장에서는 본 논문으로부터 도출된 결론과 향후과제를 서술하였다.

2장 관련 연구내용 검토

2.1 열공급시설 설계기준

2.2 열수송시설 설계기준

2.3 피로안전성 평가방법

2.4 소결



2장 관련 연구내용 검토

2.1 열공급시설 설계기준

지역난방 열원시설에서 지역난방 사용자에게 공급하는 1차측 열매체의 설계공급온도는 외기온도를 기준으로 정하고 있으며, 동절기 외기온도 0°C 이하에서는 1차측 열매체를 120°C 로 공급하여 65°C 로 회수하고, 외기온도 16°C 이상에서는 1차측 열매체를 80°C 로 공급하여 50°C 로 회수하도록 설계기준으로 규정하고 있다. 또한 지역난방 중온수 흡수식 냉동기가 설치된 지역은 흡수식냉동기가 가동되는 하절기에는 1차측 열매체를 95°C 이상으로 공급하고 80°C 로 회수하는 것으로 설계하고 있다. 그림 2-1에 외기온도에 따른 지역난방 설계온도 기준을 나타내었다(현경수 등(2008)).

여기서 지역난방 회수온도는 지역난방 열사용시설의 운전에 따라 정해지는 관계로 그림에 나타난 지역난방 회수온도는 설계 참고값을 나타낸다.

실제 지역난방 공급온도는 열원시설별 운전특성, 하절기 흡수식냉동기 가동 여부 등 계절별 특성 및 열배관의 유체흐름 특성 등 지역특성을 고려하여 열원시설별로 기준을 정해 운전하고 있으며, 지역난방 회수온도는 열공급 지역의 특성에 따라 차이가 있다.

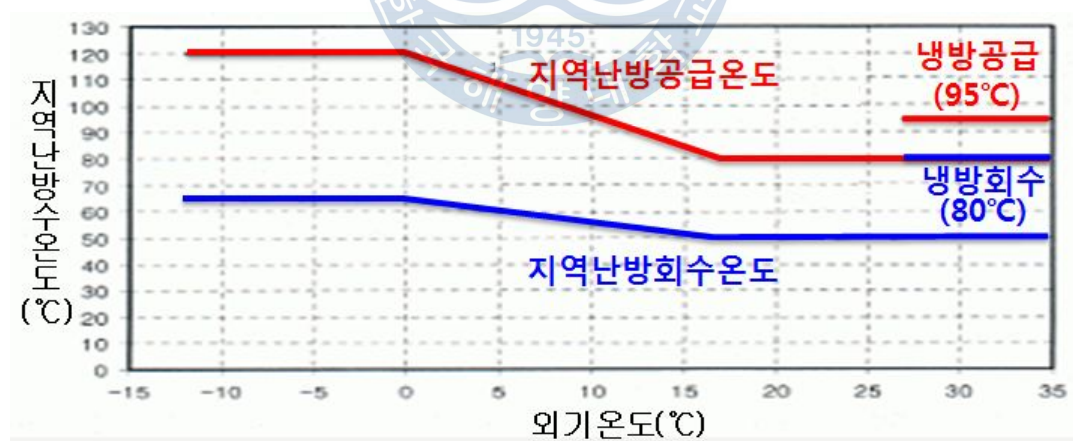


그림 2-1 지역난방 설계온도

2.2 열수송시설 설계기준

이 절에서는 이중보온관 설계 기법에 관련된 이론적 고찰을 위하여 이중보온관 구조, 열배관의 특성과 이론, 열팽창력 처리방법 등에 관한 지금까지의 연구 및 관련 기준을 종합·정리하였다.

지역난방공급 계통의 열공급 배관설계에 적용하고 있는 배관방식은 이중보온관(Preinsulated pipe)을 사용한 직접매설방식으로써 지중매설 배관에 발생하는 응력이 강관의 허용응력 범위 이내에 있도록 하여 기계적인 보상장치가 필요 없도록 설계, 시공하는 열팽창구속(Non-Compensator)방식을 적용하고 있다.

2.2.1 이중보온관의 구조

그림 2-2와 같이 내관(Carrier Pipe), 보온재(Insulation), 외관(Casing Pipe), 누수 감지선(Leak Detection Wire)으로 구성되며, 내관은 강관, 수도용 PE관, 스테인리스관, 동관, 내면 에폭시코팅관 등이 사용된다. 보온재는 120℃이하용이며, 경질 폴리우레탄 폼이 주로 사용되며, 스팀용으로는 경질 폴리우레탄 폼에 실리카(필라이트)를 추가한 것이 주로 사용된다. 또한 외관은 고밀도 PE관, AL Spiral관 등이 사용되고 누수 감지선은 Brandes Type과 나동선 Type이 있다.

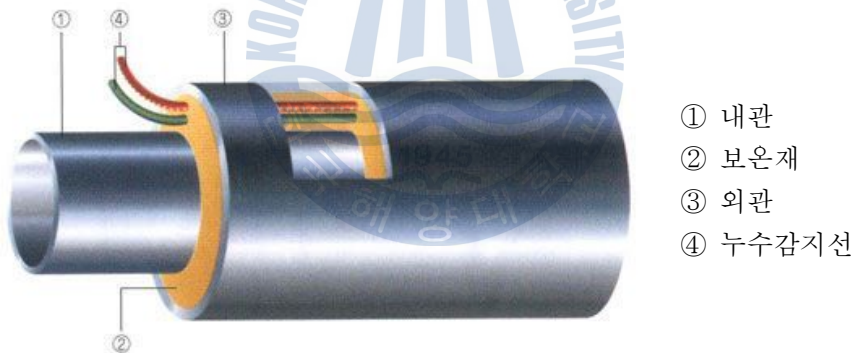


그림 2-2 이중보온관의 구조

(1) 내관(강관, Steel pipe, Carrier pipe)

이중보온관 내관은 재질 SPPS 370(규격 20A~500A), SPW 400(규격 600A~1200A)로 제작된 강관(Steel pipe)으로, 표 2-1과 같이 재질별로 KS D 3562 또는 KS D 3583의 기준에 따라 내관 재질별 검사항목에 따른 화학성분 및 기계적 성질 검사를 비롯하여 수압시험, 비파괴검사, 치수검사 등을 수행하여야 한다.

표 2-1 내관 재질

구 분	화학 성분 (%)					기계적 성질 (MPa)	
	C	Si	Mn	P	S	인장강도	항복점
SPPS 370	0.25이하	0.35이하	0.30~0.90	0.040이하	0.040이하	380이상	220이상
SPW 400	0.25이하	-	-	0.040이하	0.040이하	410이상	230이상

한편, 표 2-1에 나타낸 내관의 재질인 SPPS 370 및 SPW 400 강재에 대하여 지역 난방 열배관의 최고공용온도인 120℃를 적용하면 각 강재에 대한 항복강도는 KS B 6733에 기초하여 계산하면 표 2-2와 같이 나타낼 수 있다.

표 2-2 강관 재질별 허용축응력 기준

강관재질	항복강도(MPa)	안전률	허용축응력(MPa)	적용기준(MPa)
SPPS 370	185	1.2	154	154
SPW 400	198		165	

(2) 외관(HDPE, High Density Poly-Ethylene, Casing pipe)

외관은 내관 및 보온재를 안전하게 내장 보호하여야 하며, 열팽창 및 수축으로 인한 충격, 응력, 지중이동, 지중고정 등에 대한 마찰력, 내마모성 등이 우수해야 한다. 또한, 외관은 정전기 절연성, 지중 및 수중 습기 유해물질의 침입 및 부식 저항성, 응력부하, 피로 파손, 되메우기 및 기타 외부 손상에 대한 내구성 등이 강해야 한다.

외관은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)으로 제작되며, 외관의 치수 공차는 KS M 3407 또는 ISO 3607 규정에 따른다.

(3) 보온재(PUR, Polyurethane)

보온재는 내관 및 외관 사이의 충진재로 이중보온관의 요구 기능인 보온성을 확보하는 기능을 하며, 그 재질 특성 및 각종 보온재의 물성 및 성능은 소정의 요구조건을 만족하여야 한다. 보온재로는 발포우레탄을 주로 사용하며, 원료를 잘 혼합하여 성층, 기공, 줄무늬 같은 모양이 생기지 않도록 한다.

(4) 누수감지선(Leak Detection Wire)

강관파손 또는 외부충격 등으로 외관이 파손 되었을 때 보온재에 침투되는 습기의 절연저항 값을 감지해서 누수정도 및 누수위치를 알려주는 전기선으로 센서와이어, 리턴와이어 두가닥으로 구성되어 있다.

2.2.2 매설 열배관의 특성과 이론

(1) 매설 열배관의 특성

현재 한국지역난방공사에서 채택하여 사용하는 열배관은 공장제작이중보온관을 이용하고 있다. 또한 표 2-3에 나타난 열팽창력 제어방법 가운데 온도변화에 따른 배관재의 신축을 신축이음이나 Anchor등의 부속설비 없이 매설토압으로 열팽창력을 억제함으로써 배관재의 신축을 허용하지 않는 선응력도입법(Pre-stress method)을 적용하는 것이 가장 큰 특징이다.

또한 지역난방 열배관은 열배관 온도변화로 인한 배관재의 신축을 허용하지 않으므로 배관재의 허용응력범위에 대응하는 온도변화만을 허용하고 있다.

표 2-3 열팽창력 제어방법

구 분	방 법
Bonded System (선응력 도입법)	매설하기 전에 열배관의 온도를 높임으로써 운영 중 온도변화에 따라 발생하는 열팽창력의 크기를 배관재의 허용응력 범위내로 줄이는 방법
Expansion Joint	운영 중 온도변화에 따라 발생하는 열팽창력 및 변위량을 신축이음관이 흡수하도록 하는 방법
Compensator	Bonded System 사용법과 Expansion Joint 사용법의 중간형으로 매설하기 전 열배관의 온도를 높이는 대신 일회용 Expansion Joint 라고 할 수 있는 장치를 설치하여 열팽창력 및 변위량을 흡수하도록 하는 방법
Loop형 배관법	배관이 갖고 있는 고유의 탄성을 사용하여 열팽창력 및 변위량을 흡수하도록 하는 방법

(2) 매설 열배관의 이론

지역난방수의 온도변화에 따라 강관에서 발생하는 열팽창력(내부작용력)은 매우 커서 수백 톤에 이르게 된다. 만약 이 열팽창력을 고정시키지 않는다면 구조적으로 취약한 곳(분기관)과 힘의 방향이 바뀌는 곳(벤드, 곡점)에 힘과 변위가 집중되어 파손이 일어날 수 있다. 따라서 지역난방수의 온도변화에 따라 강관에서 발생하는 열팽창력과 변위량을 흙의 마찰력으로 고정시키는 것이 매설열배관이론의 개념이다.

그러므로 이 매설열배관이론에 따라 강관은 열팽창력에 따른 내부응력에 견딜 수 있는 재질 및 구조로 설계하고, 폴리우레탄 보온재는 강관에서 발생하는 열팽창력을 외관인 폴리에틸렌관에 전달할 수 있는 기계적 강도(접착강도, 전단강도)를 가져야 하고, 외관인 폴리에틸렌관은 열팽창력을 흙에 전달할 때 파손되지 않을 수 있는 전단강도

및 흡과의 충분한 마찰계수를 가지도록 하여 최종적으로 강관에서 발생하는 열팽창력을 흡의 마찰력으로 고정시켜야 한다.

그림 2-3에 배관에 작용하는 작용력을 나타내었다. 이 그림은 토압에 의한 배관의 정지부(중립구간)와 활동구간의 마찰이 발생하는 길이의 관계를 개략적으로 나타낸 것이다.

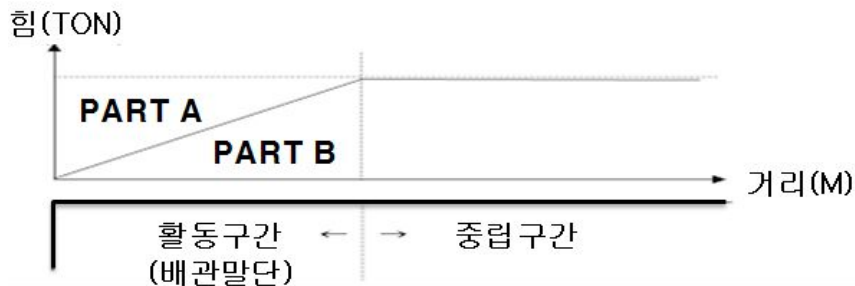


그림 2-3 배관에 작용하는 작용력

여기서, PART A 부분만큼만 실제로 길이가 증가함 (열팽창력 잔류량)

- 활동길이(Lf로 호칭)산정

PART B는 자중과 흡의 마찰력으로 인한 감소분임

2.2.3 열배관 설계

국내에서 적용중인 매설 열배관 설계개념은 지중에 매설된 열배관의 움직임을 허용하는 방식과 허용하지 않는 방식이 있다.

움직임을 허용하는 방식은 열배관에 신축이음관(Expansion joint)을 일정 간격으로 설치하여 지역난방수의 온도변화에 따라 발생하는 변위를 흡수하도록 하는 것이고, 움직임을 허용하지 않는 방식은 신축 이음장치나 Anchor를 설치하지 않고 흡의 마찰력으로 열배관의 변위발생을 억제하는 “선응력법(Pre-stress method)” 이 있다.

매설 열배관 이론을 바탕으로 하는 선응력법은 배관을 매설하기 전에 강관을 상온보다 높은 온도(약 65°C)로 예열(Pre-Heating)시킴으로써 온도 차이에 준하는 만큼의 응력이 발생하여 열배관이 신장됨으로써 선응력(Pre-stress)을 형성하는데, 물을 이용하는 방법, 전기를 이용하는 방법, 스팀을 이용하는 방법 등이 있다.

그림 2-4에 온도에 따른 고정구간의 축응력 변화의 개념을 나타내었다. 예열 실시여부에 따라 열배관에 작용하는 축응력이 다른 것을 알 수 있다. 즉, 예열을 실시하는 것에 의해 열배관을 보다 효율적으로 사용할 수 있는 것을 알 수 있다.

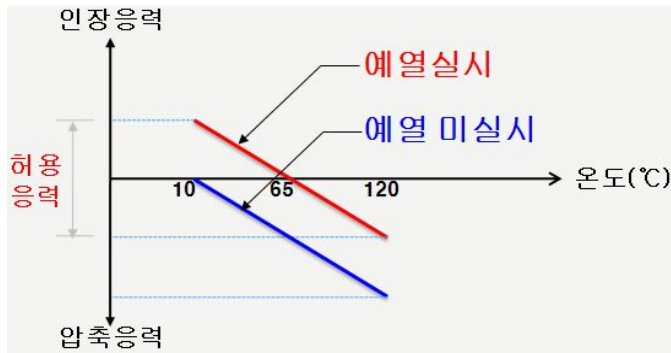


그림 2-4 온도에 따른 고정구간의 축응력 변화의 개념

(1) 예열온도 : 65℃

표 2-2에 나타낸 것과 같이 압력 배관재 강관의 허용응력을 154MPa로 하면 예열온도 65℃에 대하여 $\pm 55^\circ\text{C}$ 정도의 온도변화를 허용할 수 있게 된다. 표 2-4에 열배관의 예열유무에 따른 열응력을 나타내었다.

표 2-4 열배관의 예열유무에 따른 열응력

예열 미 실시($\Delta T=110^\circ\text{C}$)	예열 실시($\Delta T=55^\circ\text{C}$)
$\sigma_x = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$ $= 2.1 \times 1.2 \times 110$ $= 272.2\text{MPa} > 154\text{MPa}$	$\sigma_x = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$ $= 2.1 \times 1.2 \times 55$ $= 138.6\text{MPa} < 154\text{MPa}$

여기서 $E: 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ (탄성계수), $\alpha: 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (선팽창계수)

이러한 것을 고려하여 지역난방 열배관의 난방수의 공용 온도 범위는 공급관의 경우 120~80℃, 회수관의 경우 70~40℃ 를 기준으로 적용하고 있다. 또한 열배관 시공에서 65℃의 예열을 실시한 후, 매설함으로서 매설후의 허용온도변화를 55℃ 이내에서 유지할 수 있다. 이와 같이 매설 전에 65℃로 예열하여 매설하는 것이 매설 열배관의 특징이다.

(2) 강관의 피로안전성 평가 기준

강관의 피로안전성 평가기준은 EN 13942에 의하여 실시한다. 보다 상세한 내용에 대해서는 2.3절에서 상세하게 설명하였다.

(3) 강관의 접착이음

강관에 사용하는 특수접착제인 PUR(Polyurethane Foam)의 허용응력은 다음과 같다.

- 압축강도 : $\sigma_{PUR,d} = 0.15 MPa$ (장기간사용시)
 $= 0.30 MPa$ (단기간사용시)
- 전단강도 : $\tau_{PUR} = 0.1 MPa$ (장기간사용시)
 $= 0.2 MPa$ (단기간사용시)

(4) 활동길이(L_f)

그림 2-5와 같이 매설 열배관의 한쪽 단부에 팽창부가 있고 반대쪽은 무한히 긴 경우, 열배관은 온도변화와 내압, 주변 토사의 구속력에 따라 NFP(Natural Fixed Point)를 중심으로 팽창부에 연결된 일부구간은 활동하게 되고(L_f ; Friction Length, 마찰길이 또는 활동길이), 나머지 구간은 구속 상태에 있게 된다.

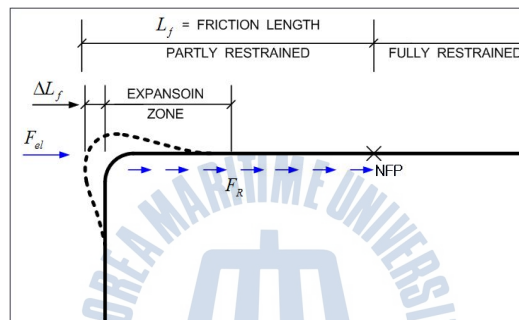


그림 2-5. 매설 열배관의 온도증가시 거동

만일 토피가 일정하고 토사와 외관의 마찰이 전 구간에서 일정하다면 구속 구간에 발생하는 구속력 F_1 은 식 (2-1)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= A_s(E\alpha\Delta T - \nu\sigma_h)(\text{압축력}) & \text{식 (2-1)} \\
 &= A_s E\alpha\Delta T - \nu \frac{Pd}{2t}(\pi dt) \\
 &= A_s E\alpha\Delta T - 2\nu P \frac{\pi d^2}{4} \\
 &\doteq A_s E\alpha\Delta T - 2\nu F_p
 \end{aligned}$$

여기서

A_s : 강관의 단면적($=\pi d \cdot t$), ΔT : 온도변화 범위

E, α : 강관의 탄성계수 및 열팽창계수

ν : 탄소강의 프와송 비($=0.3$)

σ_h : 강관의 hoop 응력

F_p : 내압으로 인한 축방향 팽창력

$$\left(=\frac{\pi d_i^2}{4} \cdot P, d_i : \text{강관의 안쪽 반지름}, P : \text{내압, 최대 16bar}\right)$$

d : 강관의 평균지름

t : 강관의 두께

활동구간의 구속력 F_2 는 그 위치에 따라 다르나 최대 크기는 그림 2-5의 NFP에서 발생하며, 그 크기는 식 (2-2)와 같다.

$$F_2 = F_R \cdot L_f - F_P + F_{el} \quad (\text{압축력}) \quad \text{식 (2-2)}$$

여기서, F_R : 단위 길이당 마찰력

F_{el} : 팽창부의 축방향 반력

강관은 강관 자체의 강성, PUR, 폼페드, PE 외관, 주변 토사의 반력의 조합으로 팽창부에서 강관의 팽창 축소 거동에 저항하는데 대략 $0.1 \sim 0.25 F_R \cdot L_f$ 의 값을 갖는다.

F_1 과 F_2 는 NFP에서 평형을 이루므로 이로부터 활동길이 L_f 를 식 (2-3)과 같이 구할 수 있다.

$$L_f = \frac{E \cdot A_s \cdot \alpha \cdot \Delta T + F_P(1 - 2\nu) - F_{el}}{F_R} \quad \text{식 (2-3)}$$

(5) 말단의 신축량(ΔL , ΔL_f)

활동길이 L_f 보다 작은 길이 L 을 갖는 열배관이 한쪽이 구속되어 말단을 향하여 열팽창할 때 말단의 신축량 ΔL 은 식 (2-4)와 같다.

$$\Delta L = \left(\alpha \Delta T + \frac{F_P(1 - 2\nu) - F_{el}}{EA_s} \right) \times L - \frac{F_R L^2}{2EA_s} \quad \text{식 (2-4)}$$

활동길이 L_f 에 대한 말단의 신축량 ΔL_f 는 식 (2-4)의 L 에 L_f 를 대입하면 식 (2-5)와 같다.

$$\Delta L_f = \frac{F_R L_f^2}{2EA_s} \quad \text{식 (2-5)}$$

2.3 피로안전성 평가방법

2.3.1 피로안전성 평가 개요

District Heating Handbook(European District Heating Pipe Manufacturers Association, 1997)에 의하면 강제 열배관에서의 한계상태 조사방법이 그림 2-6와 같이 규정되어 있다. 이 기준에서는 연구대상 열배관의 온도변화에 대해서는 저주기피로(Low cycle fatigue)인 Limit State B1을 적용하여 열배관 안전성을 평가하도록 규정되어있다.

Limit state A1 One severe action		Limit state A2 Stepwise plastic deformation	Limit state B1 Low cycle fatigue	Limit state B2 High cycle fatigue	Limit state C1 Local bucking	Limit state C2 Global instability
Force-controlled action		Force- and deformation- Controlled action	Force- and deformation- Controlled action	Force- and deformation- Controlled action	Force- and deformation- Controlled action	Force- and deformation- Controlled action
Membrane stresses σ_m	Resulting stresses σ_{res}	Maximum strain ϵ_{max}	Resulting stresses range spectrum	Resulting stresses range spectrum		
Mean stress In component wall	Maximum Stress in Component wall		Maximum stress range S			
			1945	See Eurocode 3		Clause 5.5

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq \frac{1}{\gamma_{fat}}$$

그림 2-6 강제 열배관에서의 한계상태의 조사방법

따라서 열배관에서의 한계상태의 조사방법은 열배관의 상세에 따라 표 2-5와 같이 고려하여야한다.

<열배관의 상세>

1. straight sections
2. welds
3. long bends(elastically laid or pre-manufactured)
4. small angular deviations and single mitred bends
5. bends
6. branch connections(tees)
7. reducers
8. underground expansion joints (one-time compensators as well as permanent expansion joints)
9. valves and other accessories
10. dished ends and flanged connections
11. interface with other systems

표 2-5 한계상태 조사방법에 따른 열배관의 상세

Limit state	Component
A1. One severe action	All
A2. Stepwise plastic deformation	1 to 4
B1. Low cycle fatigue	2 to 8
B2. High cycle fatigue	All(where relevant)
C1. Local buckling or folding	1 to 4 and 7
C2. Flexural buckling (global instability)	1 and 3
C3. Loss of equilibrium	Whole system and parts thereof
D. Serviceability	All

표 2-5에서는 한계상태에 따라 평가대상이 되는 11가지의 열배관 상세에 대한 적용 구조부재를 나타내고 있다. 따라서 이론적인 측면에서는 무엇보다도 위의 표에 언급된 조합에 대하여 검토를 해야 한다. 그러나 일반적으로 매설된 열배관은 표 2-6과 같은 조합들에 의해 한계상태 조사방법이 결정된다.

표 2-6 열배관의 상세에 따른 한계상태 조사방법

Component	Limit state
Straight pipes	Limit state C1
Curved pipes	Local buckling or folding
Straight and curved pipes in settlement areas and/or with high pressures	Limit state A2 Stepwise plastic deformation
Bends Tees Small angular deviations Single and multiple mitre bends Welds with misalignment	Limit state B1 Low cycle fatigue
For pipes with limited soil cover High groundwater table Parallel excavation	Limit state C3 Flexural buckling

따라서 본 연구에서는 Welds, Bends, Tees를 고려하여 Limit state B1인 Low cycle fatigue를 적용하였다. 따라서 피로수명 평가가 필요하며 이를 위해 본 연구에서는 사이클기반 평가법과 응력기반 평가법을 적용하여 지역난방수의 온도변화가 배관의 수명에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2.3.2 사이클기반 평가법

사이클기반 피로수명 평가법은 등가전온도사이클수(Number of equivalent full temperature cycle, N_0)를 산출하고 이를 기초로 피로안전성을 평가하는 방법이다. 여기서의 등가전온도사이클수(N_0)란 열배관 공용수명동안 측정이나 실험에 의해 얻어진 실제온도를 이상화시킨 값으로 사용기간 동안의 공용온도범위에 대한 기준횟수를 의미한다. 즉, 피로파괴에 영향을 주는 각각의 온도변화응력을 등가화 시켜서 누계한 값이다. 이 평가법에서의 열배관 피로안전성 평가는 식 (2-6)의 Miner's rule에 기초하여 산출된다.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq \frac{1}{\gamma} \quad \text{식 (2-6)}$$

여기서, n_i : 각 응력범위에서의 작용횟수

N_i : 피로설계곡선 기준응력에 대한 허용횟수

γ : 부분안전계수

부분안전계수 γ 는 공용조건 및 극한상태에 대한 소요 안전여유치를 나타낸 계수이다. 공용중 온도변화에 대해서는 1.0을 적용한다(European District Heating Pipe Manufacturers Association, 1997).

다음으로 열배관에 적용되고 있는 등가전온도사이클 개념과 열배관의 피로선도인 $N = (\frac{k}{S})^b$ (여기서, N : 주어진 응력범위에 대한 S-N선도에서의 반복횟수, k : S-N선도에서의 상수, S : 응력범위, b : 피로곡선의 기울기(3~5범위의 변수))로부터 $N_i = (\frac{k}{c\Delta T_i})^b$ 를 적용하면 식 (2-7)와 같이 된다.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{k^b} [n_1 (c\Delta T_1)^b + \dots + n_i (c\Delta T_i)^b] \leq \frac{1}{\gamma} \quad \text{식 (2-7)}$$

위에서 ΔT_i 는 평가대상 열배관에서의 온도변화 범위이다. $\Delta T_i = \Delta T_{ref}$ 일 경우, 등가전온도사이클수 N_0 는 식 (2-8)과 같이 된다.

$$N_0 = \frac{k^b}{(c\Delta T)^b} \sum \frac{n_i}{N_i} = n_1 (\frac{\Delta T_1}{\Delta T_{ref}})^b + \dots + n_i (\frac{\Delta T_i}{\Delta T_{ref}})^b \quad \text{식 (2-8)}$$

$$\text{또는, } N_0 = \frac{1}{(\Delta T_{ref})^b} \sum n_i (\Delta T_i)^b$$

여기서, ΔT_{ref} 는 대상열배관의 기준온도(reference temperature)로서 공용중의 최대온도 변화량을 나타내며, 배관의 온도조건에 따라 서로 다른 값을 가진다. 일반적으로 110℃ 또는 최대 온도범위보다 10℃ 작은 값으로 제시된다.

표 2-7에 내구연한 30년 기준에 대한 지역난방 열배관 종류에 따른 등가전온도사이클 제한범위를 나타내었다. 평가기준은 IEA(International Energy Agency, 국제에너지기구)기준 및 CEN(Comité Européen de Normalisation, 유럽표준위원회)기준이 있으며, IEA기준은 b가 3인 경우에, CEN기준은 b가 4인 경우에 일반적으로 적용한다(European District Heating Pipe Manufacturers Association, 1997).

표 2-7 사이클기반 평가기준(내구연한 30년 기준)

구 분	등가전온도사이클 제한범위		허용응력범위 (MPa)
	IEA 기준	CEN 기준	
주 배 관	100~250 cycles	100 cycles	889
분 배 관	250~500 cycles	250 cycles	841
사용자(단지내)배관	500~2500 cycles	1,000 cycles	595

2.3.3 응력기반 평가법

응력기반 평가법은 Miner's rule(1945)에 따라 구조물 대상부재에 대해 응력해석을 실시하고, 해당등급에 대한 피로곡선을 이용하여 식 (2-9)와 같이 피로손상계수(CDF : Cumulative Damage Factor)를 산정하고, 이를 토대로 수명을 예측하는 방법이다.

$$CDF = \sum_{i=1} \frac{n_i}{N_i} \quad \text{식 (2-9)}$$

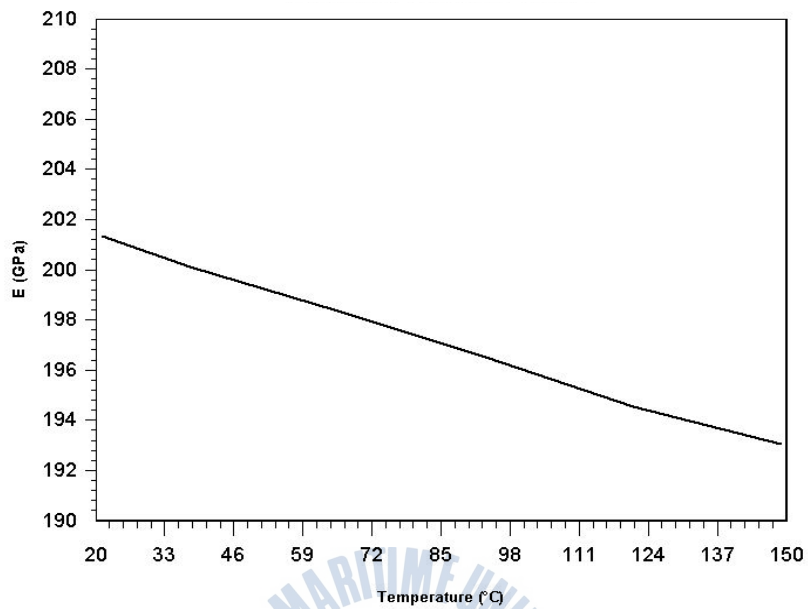
여기서, n_i 는 각 응력범위에 따른 작용횟수, N_i 는 피로설계곡선에서 얻어지는 각 응력기준에 대한 허용횟수이다. 따라서 식 (2-9)에서 피로손상계수가 1.0이 되면 피로 수명이 소진된 것으로 판단할 수 있다.

지역난방 열배관에 작용하는 온도하중에 대한 사이클계수를 이용한 응력기반 평가법에서는 온도변화(ΔT)에 따른 열배관 응력은 식 (2-10)과 같이 산정된다.

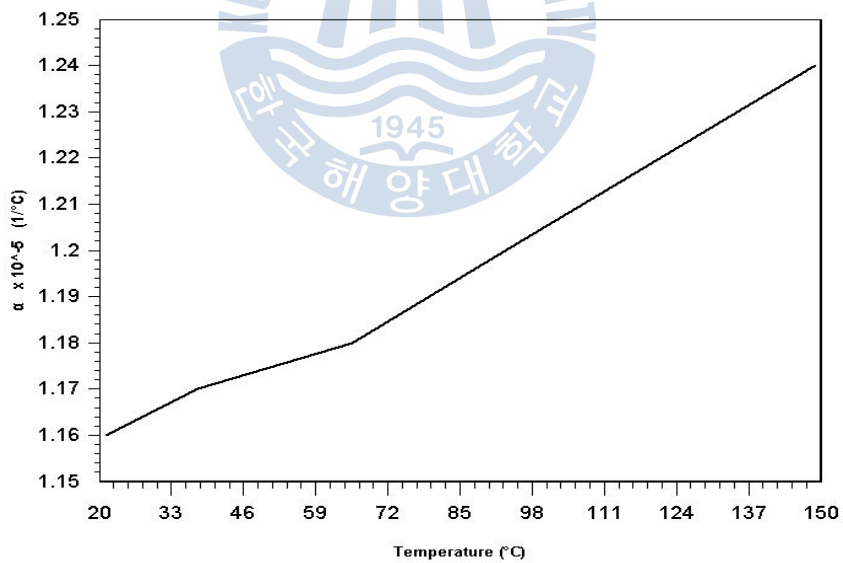
$$\sigma = E\epsilon = E\alpha(\Delta T) \quad \text{식 (2-10)}$$

여기서, E : 탄성계수, ϵ : 변형률 α : 열팽창계수

그림 2-7에 본 연구에 적용한 ASTM(American Society of Testing and Materials 1989, 미국재료시험협회) 기준에서의 온도에 따른 열배관 탄성계수 및 열팽창계수의 변화그래프를 나타내었다.



(a) 탄성계수



(b) 열팽창계수

그림 2-7 온도에 따른 열배관의 탄성계수 및 열팽창계수 (ASTM기준)

그림 2-8에 열배관 피로안전성 평가에 사용되는 설계피로곡선 사례를 나타내었다. 그림에서 EC3(Eurocode 3)는 본 연구재료(SPPS 370)와 유사재료에 대한 등급인 DC(Detail Category) 71이며, MarkI 및 Kim은 유사선행연구에서 제안된 설계피로곡선이다. 본 연구에서는 지역난방 열배관의 피로안전성을 검토하기 위하여 가장 취약부위의 맞대기 용접이음부에 대한 EC3의 DC71의 설계피로곡선을 적용하였다. 여기서 EC3는 반복횟수 500만회를 기준으로 500만회 이전에는 1:3, 500만회 이후에는 1:5의 기울기를 사용하였다.(European Standard, 2004)

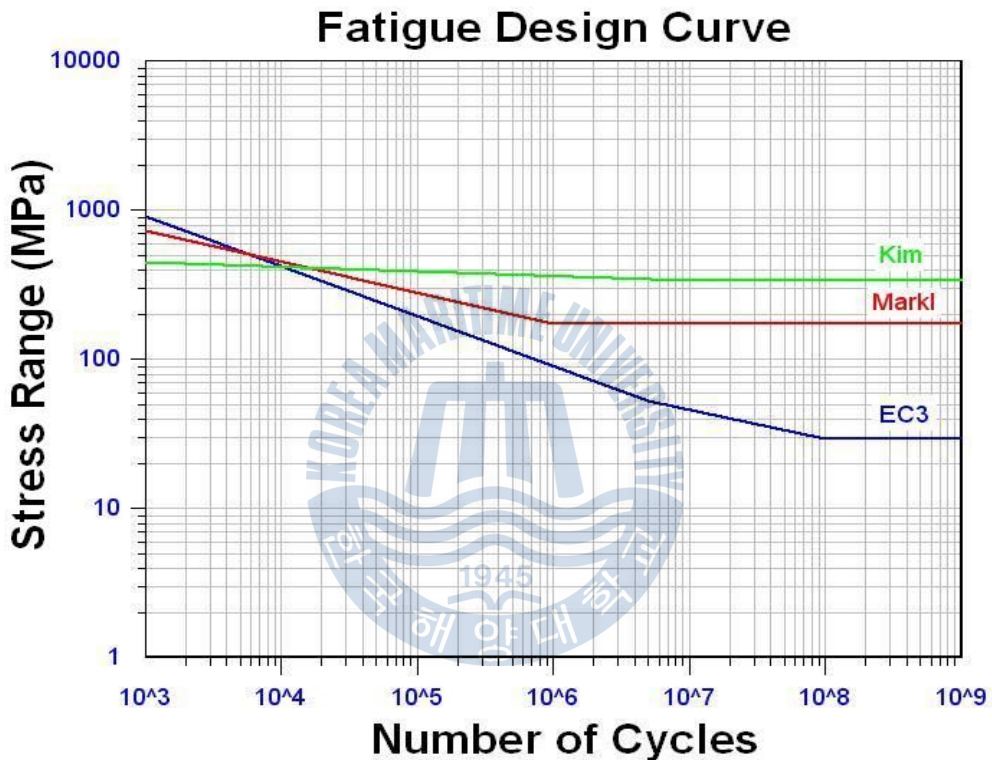


그림 2-8 피로수명예측에 사용된 S-N곡선

2.4 소결

본 연구에 관련된 기존 연구 및 관련 규정과 지역난방 열배관의 온도이력 특성 및 회수온도 저감과 관련된 자료조사로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 열공급시설 설계기준에서는 지역난방의 특성을 고려하여 지역난방의 공급온도 및 회수온도를 외기온도를 기준으로 규정하고 있으므로, 지역난방의 사용자 특성을 고려하여 적절한 설계온도를 규정하는 것이 필요하다.

2) 열수송시설 설계기준에서는 지역난방 열배관에 사용되는 열배관의 재료적인 특성 등에 따라 열배관을 분류하여 적용하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 열배관의 매설에 따른 거동 특성을 분석하기 위해서는 매설관의 열팽창력 제어방법 및 매설시 실시하는 열배관의 예열온도와 열배관 매설에 따른 거동 특성과의 관계를 사전에 충분히 인식하는 것이 설계시 중요한 요소로 조사되었다.

3) 지역난방 열배관의 지속적인 온도변화에 따른 피로거동은 다양한 한계상태에 따라 적용방법에 차이를 나타내고 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 온도변화에 따른 열배관의 피로평가는 적용되는 구조상세에 따라 달라지나, 본 연구에서의 대상구조에 대해서는 저주기피로의 개념을 적용하는 것이 타당한 것으로 조사되었다.

4) 본 연구에서의 저주기피로에 대한 열배관 피로평가는 등가전온도사이클수를 기반으로 하는 사이클기반 평가법과 Miner's rule에 기초한 응력기반 평가법을 적용할 수 있는 것으로 조사되어 본 연구에서는 이들 방법에 기초한 피로안전성 평가를 실시하고자 한다.

3장 지역난방 열배관 거동에 관한 실측조사

3.1 열배관 온도측정에 관한 선행연구

3.2 온도측정데이터 특성 분석

3.3 소결



3장 지역난방 열배관 거동에 관한 실측조사

3.1 열배관 온도측정에 관한 선행연구

열배관 피로안전성 평가를 위하여 먼저 선행유사연구의 자료수집 및 분석을 실시하였다. IEA 보고서(IEA District Heating and Cooling 1996, 1999)에서는 1995년과 1997년에 한국지역난방공사의 전체적인 열배관 안전성 확보 및 저주기피로 안전성을 평가하기 위해 각기 다른 대상지구를 선정하여 온도데이터를 측정하고 분석하였다.

1995년 데이터에서는 열원공급단지의 주배관 및 사용자배관의 공급관에 계측센서를 부착하여 온도계측을 1995년 2월부터 1996년 2월까지 1년간 실시하였다. 대상지역 열배관의 온도 측정위치는 그림 3-1에 나타난 것과 같이 지역난방 공사에서 관리하고 있는 분배관을 대상으로 하였다.

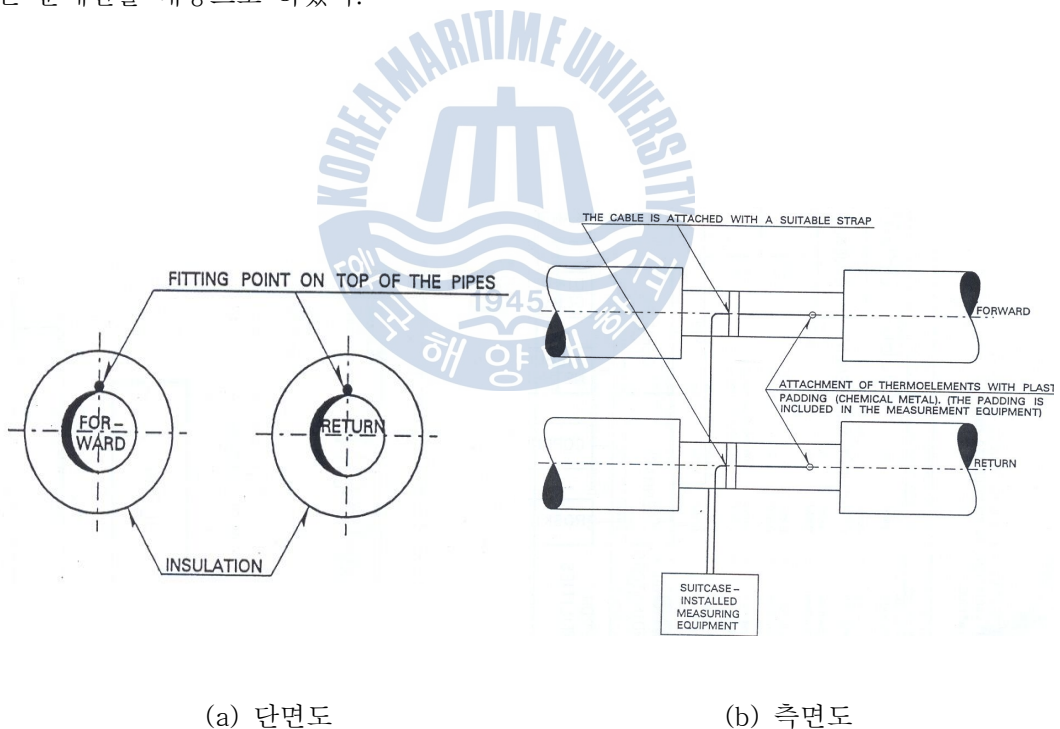
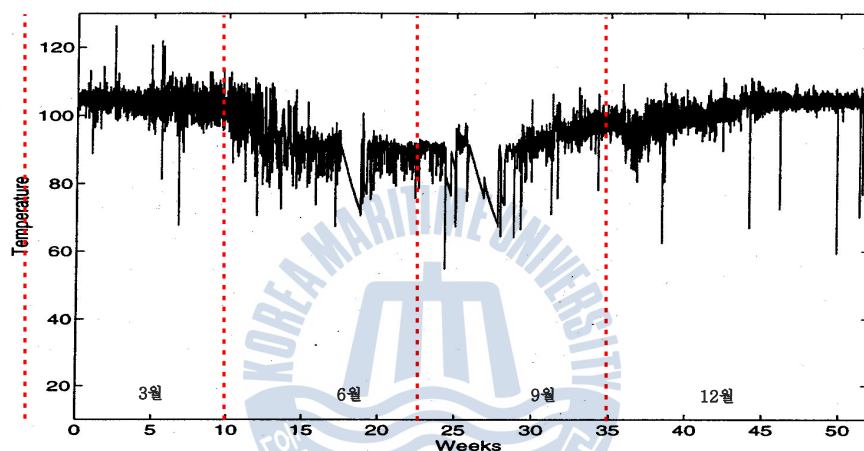


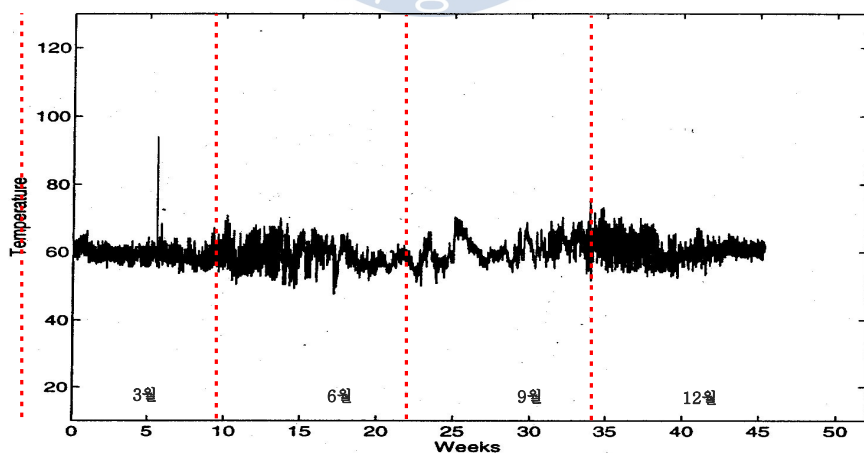
그림 3-1 열배관의 온도측정위치

주배관 및 사용자배관에 대한 1년간의 측정데이터(1995년)의 일례를 그림 3-2에 나타내었다. 주배관의 경우, 공급관은 하절기에 평균온도를 약간 하회하는 경향을 나타내었으며, 회수관은 온도변화 없이 거의 일정한 것으로 나타났다. 또한 공급관이 회수관보다 온도변화가 약간 크게 발생하는 것으로 나타나 온도변화에 따른 피로 영향이 더 크게 나타날 것으로 판단되었다.

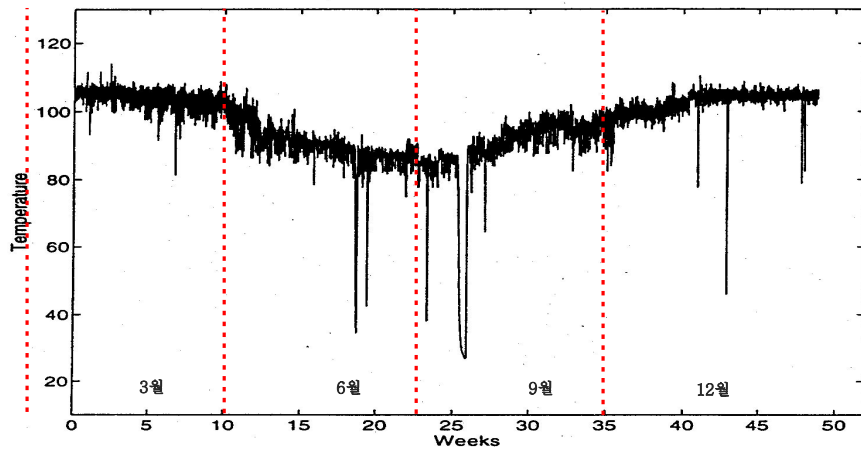
사용자배관의 경우, 공급관은 주배관 공급관에 비하여 각 측정일에서 평균온도 폭의 변화가 적게 나타났으며, 회수관은 주배관 회수관에 비하여 각 측정일에서 평균온도와 온도 폭의 변화가 크고 전체적으로 주배관에 비하여 전달 열공급수의 열전달작용에 의해 온도가 약간 낮은 경향을 나타내었다.



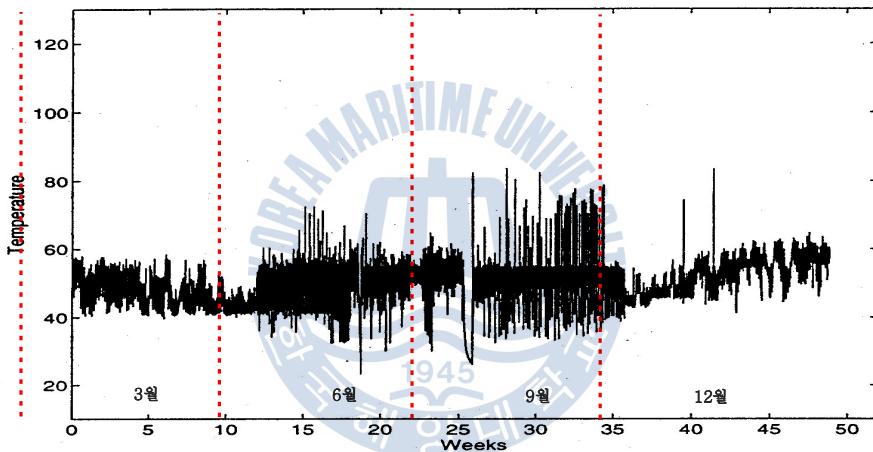
(a) 주배관 공급관



(b) 주배관 회수관



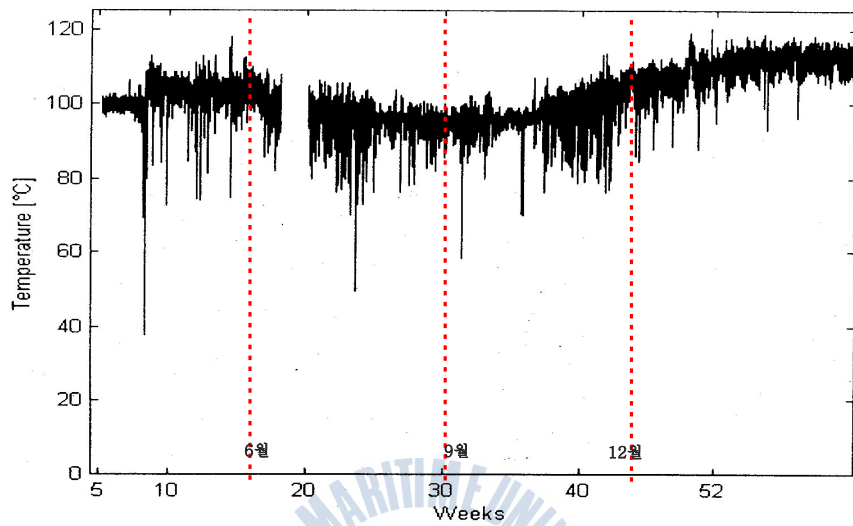
(c) 사용자배관 공급관



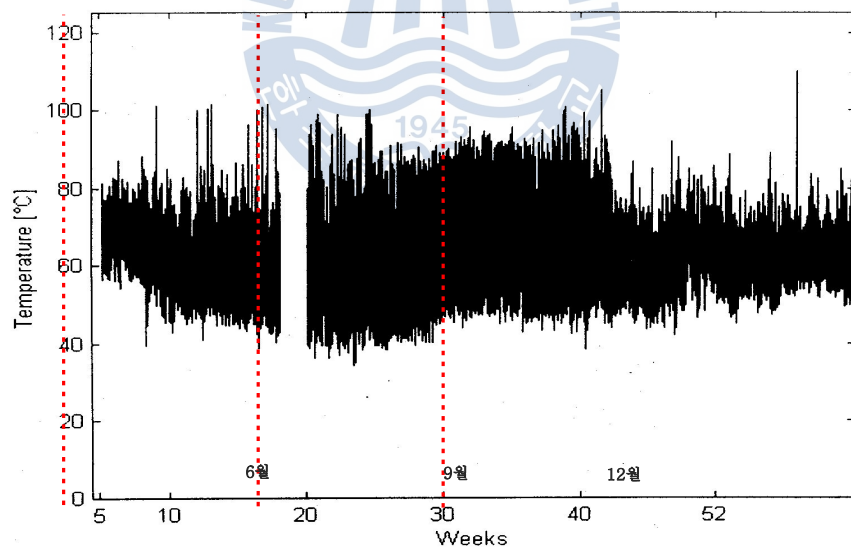
(d) 사용자배관 회수관

그림 3-2 온도측정데이터의 일례 (1995년)

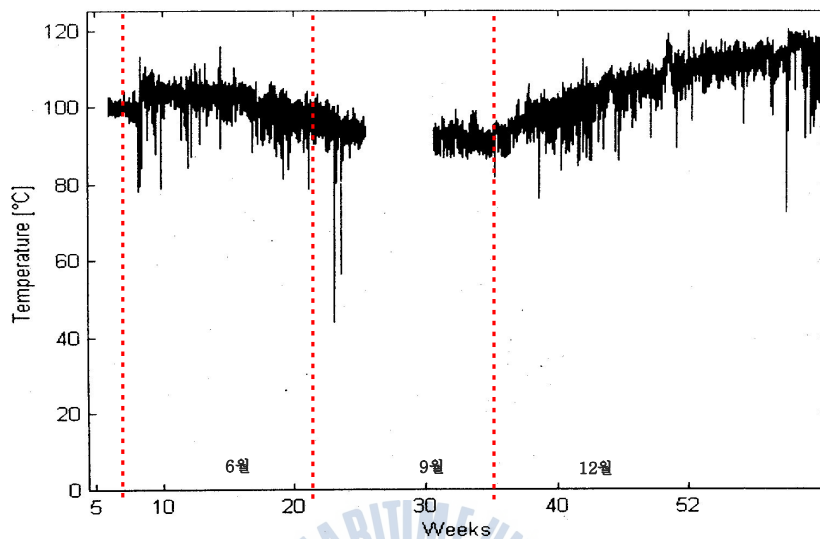
1997년 데이터는 온도측정지역을 달리하여 사용자배관에 대해서만 1997년 2월부터 1998년 2월까지 1년간 측정을 실시하였다. 그림 3-3에 1년간의 온도측정데이터(1997년)의 일례를 나타내었다. 사용자배관 온도측정 분석 결과, 공급관보다 회수관에서 각 측정일에서 평균온도 및 온도 변화의 폭이 크게 나타났으며, 일정기간 열원 공급이 중단되는 휴지기에 대한 경향이 없는 것으로 나타났다. 이는 사용자 배관의 열사용 패턴 특성이 반영된 결과에 의한 것으로 판단된다.



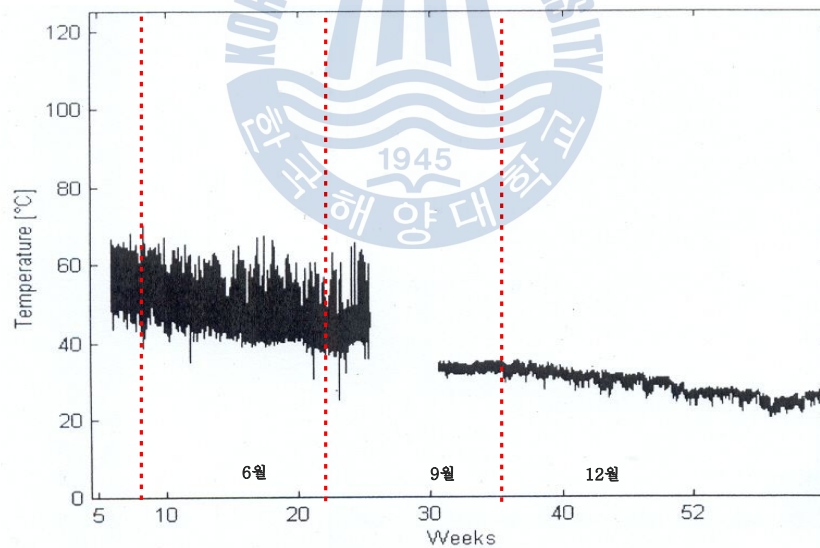
(a) 사용자배관 공급관(A아파트)



(b) 사용자배관 회수관(A아파트)



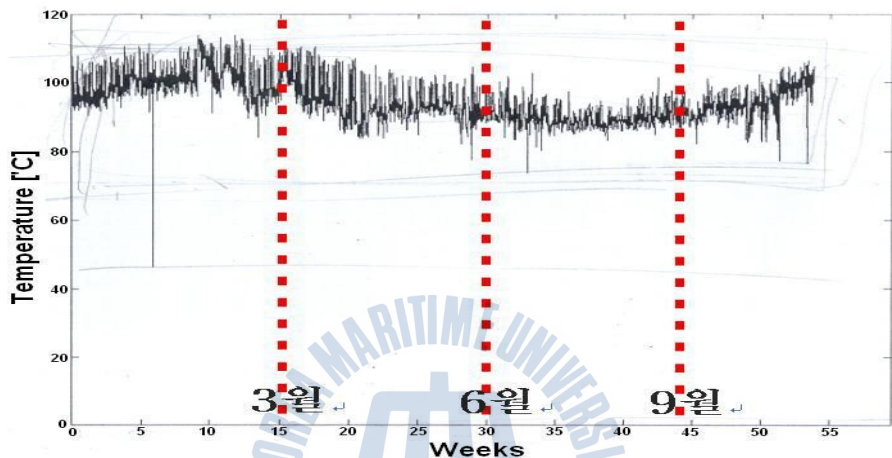
(c) 사용자배관 공급관(B아파트)



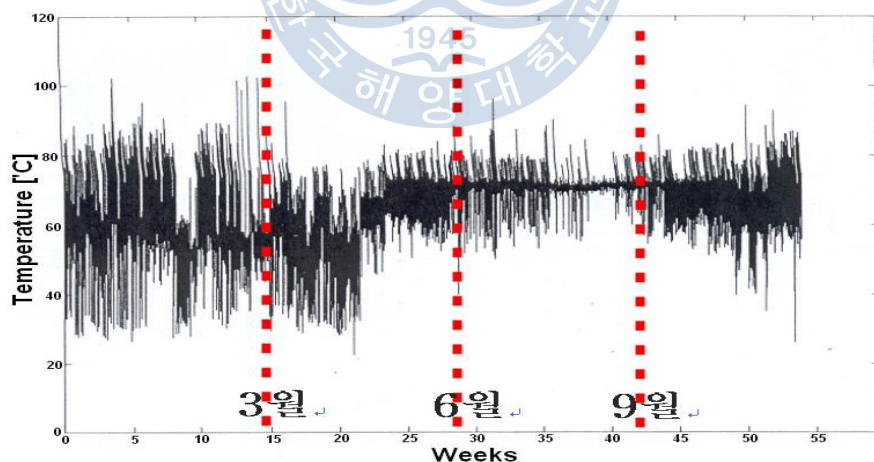
(d) 사용자배관 회수관(B아파트)

그림 3-3 온도측정데이터의 일례 (1997년)

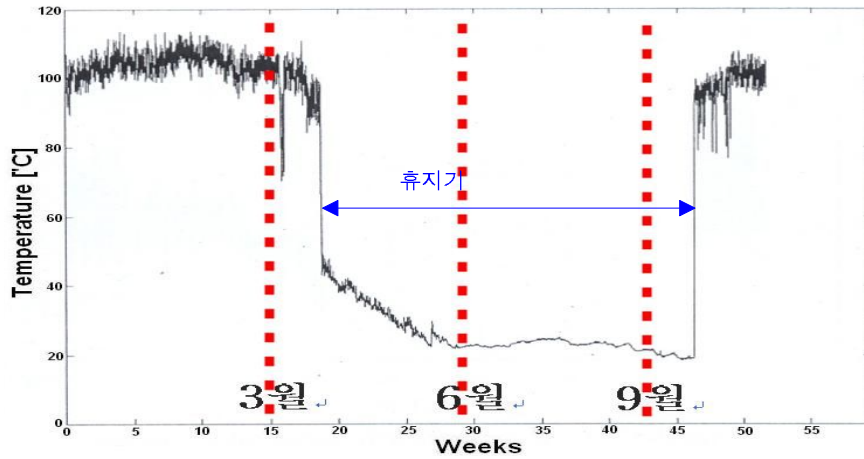
또한 다른 기존연구(Y.S Chang(2003), 장윤석 등(2005))에서는 2003년 11월부터 2004년 11월까지 사용자배관 10개 지역에서 1년간 온도측정을 실시하였다. 이 연구에서의 1년간 측정결과의 일례를 그림 3-4에 나타내었다. 여기서도 사용자배관 공급관 및 회수관에서 온도를 측정하여 그 결과를 그림 3-2의 사용자배관의 경우와 유사하게 나타났다. 다만, 측정데이터 결과를 보면 공공기관의 일부 데이터에서 그림 3-4(c), (d)와 같이 하절기에 일정한 휴지기가 있는 것으로 나타났다



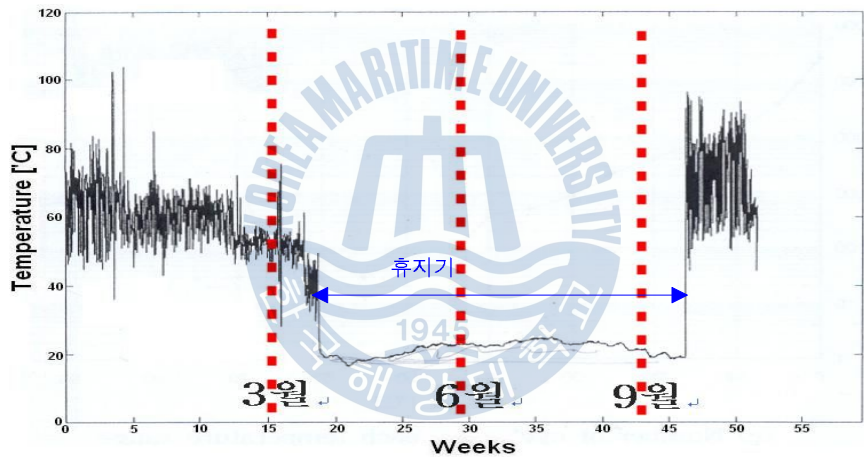
(a) 사용자배관 공급관(C학교)



(b) 사용자배관 회수관(C학교)



(c) 사용자배관 공급관(D공공건물)



(d) 사용자배관 회수관(D공공건물)

그림 3-4 온도측정데이터의 일례 (2004년)

이상의 데이터를 분석한 결과, 열배관 종류에 따른 데이터 측정위치 및 사용자배관의 공용조건에 따라 열배관의 온도변화경향은 다양한 특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

3.2 온도측정데이터 특성 분석

지역난방수 온도변화가 열배관 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위해 연구대상지역 A지구의 6개소에서 기계실 내부의 사용자배관의 공급관 및 회수관에서 온도데이터를 수집하였다. 그림 3-5에 온도데이터 측정을 실시한 대상지역을 나타내었다. 대상지역 A지구의 열배관 설치는 2003년 이전 기준으로 실시되었으며, 열배관 공용온도도 2003년 이전 기준으로 운영되고 있는 것으로 조사되었다.

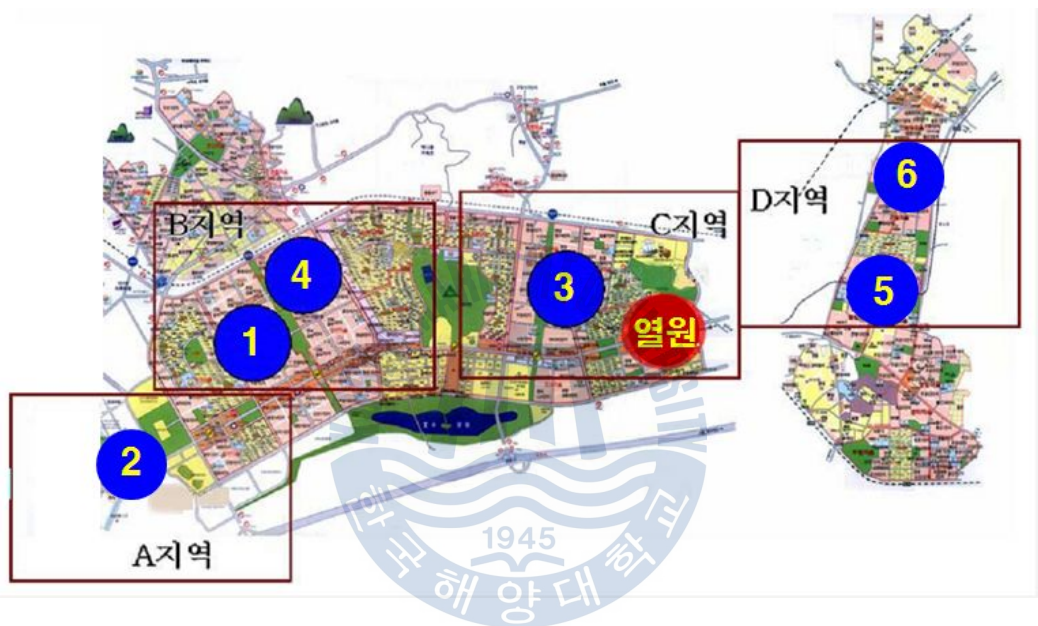


그림 3-5 온도데이터 측정대상 지역 (A지구)

온도측정데이터의 위치 및 특성을 표 3-1에 나타내었으며, 공급관 및 회수관에서의 측정개요의 일례를 그림 3-6에 나타내었다. 이들 측정위치에서의 데이터 가운데 본 연구에서는 공급관인 T-S1 및 회수관인 T-R1에서의 측정데이터를 연구대상으로 하였다. 지역난방수의 흐름은 그림 3-6에 나타난 것과 같이 열원에서 주배관과 분배관을 통하여 사용자배관으로 고온의 지역난방수가 공급되며, 난방 열교환기 및 급탕 열교환기에서 고온의 지역난방수가 라디에이터의 원리와 같이 열을 방출하고 다시 회수관을 통하여 열원으로 보내어진다.

표 3-1 온도측정데이터의 위치 및 특성

번호	측정위치	측정날짜	측정간격
1	E 아파트	2005/07/01 00:00~2006/07/31 24:00	30분
2	F 아파트	2005/07/01 00:00~2006/07/31 24:00	30분
3	G 아파트	2005/07/01 00:00~2006/07/31 24:00	30분
4	H 아파트	2005/07/01 00:00~2006/07/31 24:00	30분
5	I 아파트	2005/07/01 00:00~2006/07/31 24:00	30분
6	J 아파트	2005/07/01 00:00~2006/07/31 24:00	30분

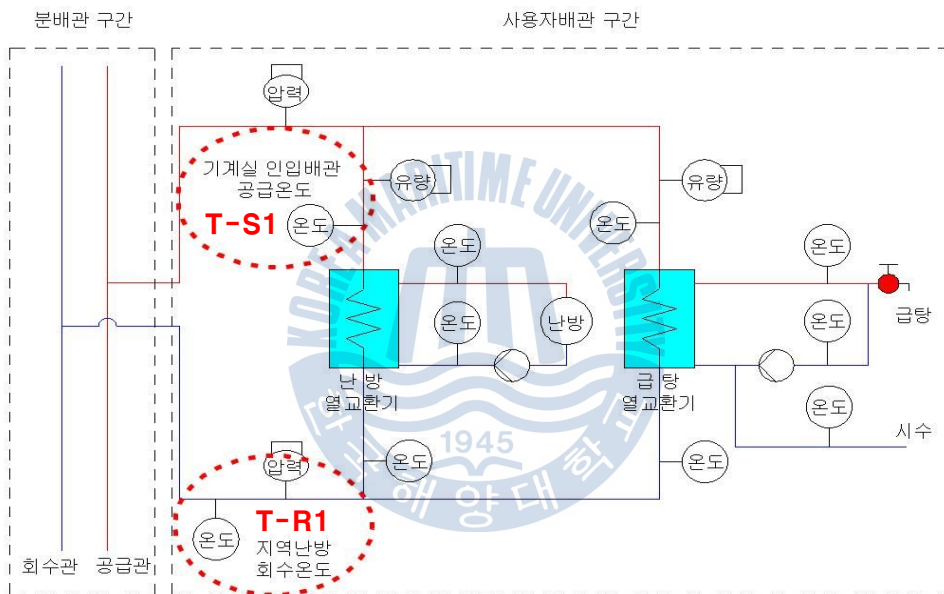


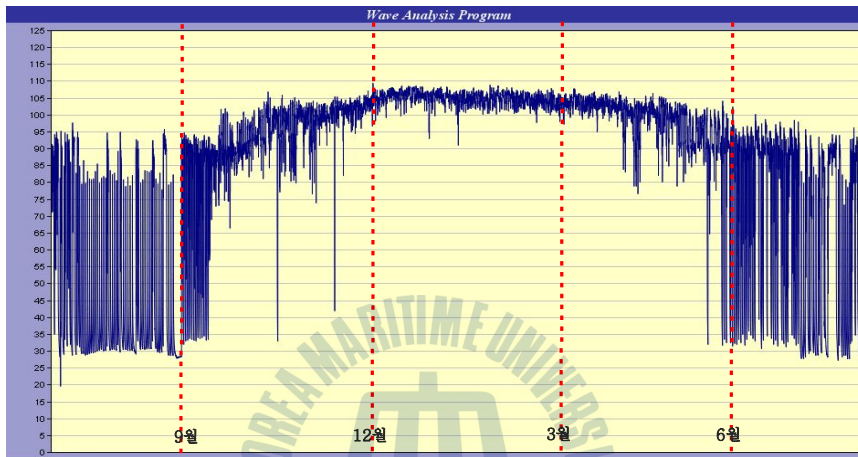
그림 3-6 공급관 및 회수관 측정개요의 일례 (E아파트)

그림 3-7 및 그림 3-8에 대상지역의 E 및 H아파트에서 측정된 공급관 및 회수관에서의 1년 측정 온도그래프의 일례를 나타내었다. 그림 3-7의 E아파트에서의 1년간 온도데이터는 그림 3-4에 나타낸 선행연구(장윤석 등, 2005)에서와 같이 하절기에 휴지기 현상은 나타나지 않으나, 사용환경의 영향으로 큰 온도변화가 주기적으로 나타나 온도응력에 의한 피로검토가 필요한 것으로 조사되었다. 이들 온도그래프 특징으로부터 지역 단지 내에서는 하절기에도 지역난방수 공급이 주기적으로 단속되면서 지속적으로 공급되고 있는 것을 알 수 있다.

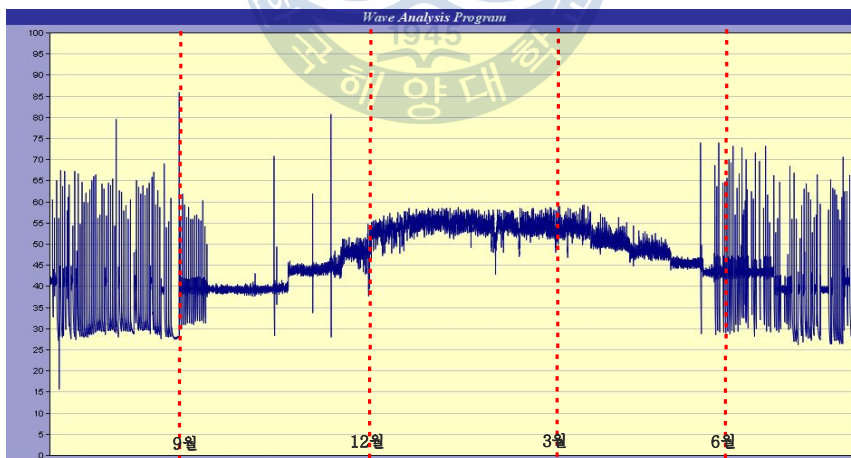
한편 그림 3-8의 H아파트의 경우, 공급관 및 회수관에서의 1년간 온도변화의 범위는 작은 것으로 나타났으며, 측정온도도 거의 일정한 범위 내에서 변동하는 것으로 나

타났다. 이와 같이 사용자 배관에서 측정된 데이터도 지역난방공사에서 관리하는 분배관의 온도특성 및 사용자 배관의 사용특성 등이 반영되고 있는 것으로 나타났다.

다른 아파트에 대한 1년간의 온도측정데이터에 대한 결과를 부록 1 온도그래프에 나타내었다. 다른 지역에서의 온도측정데이터 결과도 E아파트 혹은 H아파트에서의 온도 측정 결과와 유사한 결과를 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

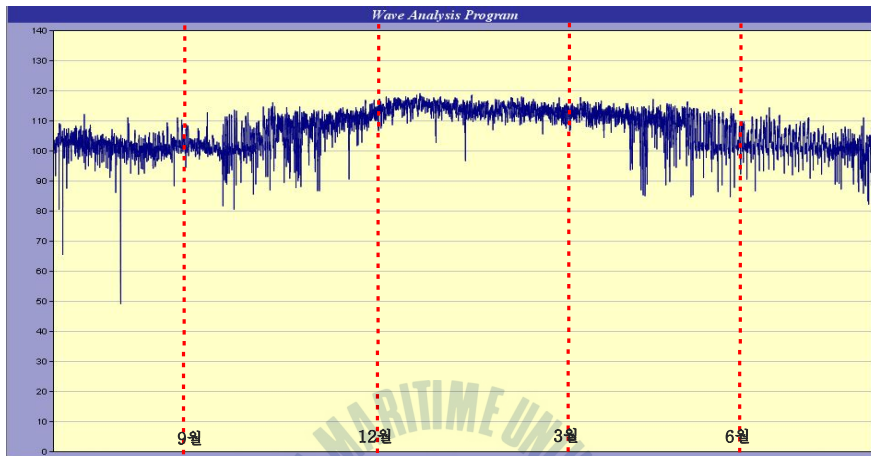


(a) 공급관

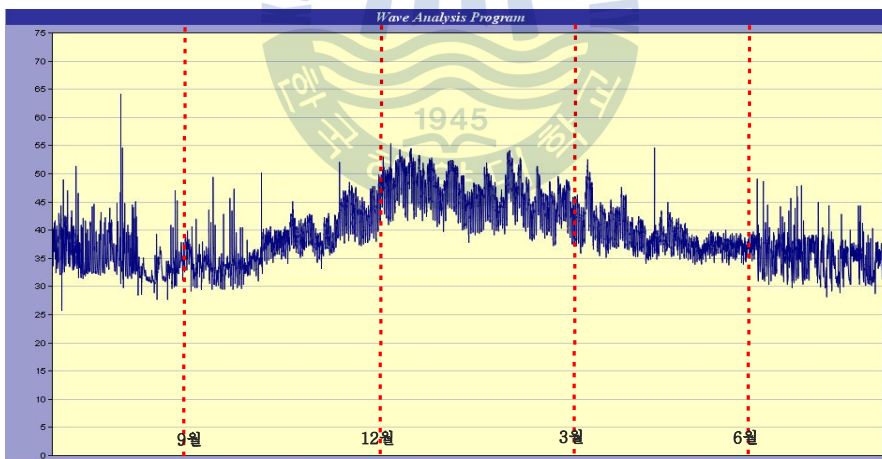


(b) 회수관

그림 3-7 공급관 및 회수관의 1년 측정 온도그래프 (E아파트)



(a) 공급관



(b) 회수관

그림 3-8 공급관 및 회수관의 1년 측정 온도그래프 (H아파트)

3.3 소결

선행연구 및 본 연구에서 대상으로 하고 있는 주배관, 분배관, 사용자 배관을 대상으로 1년간 측정된 온도측정 데이터의 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기존 연구에서의 실측 데이터 분석결과, 열배관 종류에 따른 데이터 측정위치 및 사용자배관의 공용조건에 따라 열배관의 온도변화경향은 다양한 특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

2) 본 연구에서의 사용자 배관을 대상으로 한 1년간의 온도측정 데이터 분석결과, 측정 대상지역의 열배관 사용 특성에 따라 지역난방공사에서 관리하는 분배관의 온도특성 및 사용자 배관의 사용특성 등이 반영되고 있는 것으로 나타났다.

3) 연구대상 배관의 계측장소에서는 하절기에 휴지기 현상은 나타나지 않았으나, 일부 측정데이터의 경우에는 사용환경의 영향으로 큰 온도변화가 주기적으로 나타나 온도응력에 의한 피로검토가 필요한 것으로 조사되었다. 이들 온도그래프 특징으로부터 지역 단지 내에서는 하절기에도 지역난방수 공급이 주기적으로 단속되면서 지속적으로 공급되고 있는 것을 알 수 있었다.



4장 피로안전성 평가

4.1 지역난방 열배관 온도이력의 Rainflow Counting 계수

4.2 사이클기반 피로안전성 평가

4.3 응력기반 피로안전성 평가

4.4 소결



4장 피로안전성 평가

4.1 지역난방 열배관 온도이력의 Rainflow Counting 계수

연구대상 열배관의 측정 온도데이터에 대해 Rainflow Counting Method를 사용하여 측정온도에 대한 사이클계수 결과를 나타내었다. 표 4-1에 공급관과 회수관에 대한 사이클계수결과의 일례를 나타내었다. 표에서 가로축은 측정온도범위를 나타내며 세로축은 온도변화범위를 나타낸다. 측정온도와 온도변화의 범위는 5℃씩 증가하도록 동일하게 설정하였다. H아파트의 경우, 공급관 측정온도범위는 110~115℃가 가장 많았으며, 이들 측정온도에 대한 온도변화범위는 5℃미만이 가장 많은 것으로 나타났다. 열배관 피로거동에 영향을 미치는 공급관 온도변화범위의 횟수가 많은 것은 100~105℃ 범위의 25~30℃인 것으로 나타났다. 한편 회수관의 경우, 측정온도범위는 35~40℃가 가장 많았으며, 피로거동에 영향을 미치는 온도변화범위의 횟수가 많은 곳은 40~45℃범위의 20~25℃인 것으로 나타났다.

다른 아파트에 대한 1년간의 온도측정데이터에 대한 Rainflow Counting 계수 결과를 부록 2 사이클계수결과에 나타내었다. 다른 지역에서의 온도측정데이터 결과도 H아파트에서의 사이클 계수 결과와 유사한 결과를 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

이상으로부터 공급관 및 회수관의 측정온도범위는 약간 차이를 나타내고 있으나 공급관은 100~105℃, 회수관은 40~45℃가 가장 많은 것으로 나타났다. 대상 측정온도 데이터는 사용자배관에서 측정하였으나, 열원에서 공급되는 공용온도조건과 비교하였을 때, 주배관 및 분배관의 온도특성과 유사한 패턴을 가지고 있는 것으로 판단된다.

여기서 연구대상 열배관의 온도데이터는 30분 간격으로 측정된 값을 사용하였는데, 이는 지역난방 운전온도는 30분 이내에 싸이클을 형성 할 만큼 온도 변화 값이 크지 않기 때문이다. 그러므로 1분 내외의 간격으로 데이터를 취득하더라도 최대-최소법으로 필터링하고, 사이클계수법을 사용하여 분석 할 경우 피로안전성 평가 결과에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

표 4-1 사이클계수 결과 일례 (H아파트)

(a) 공급관

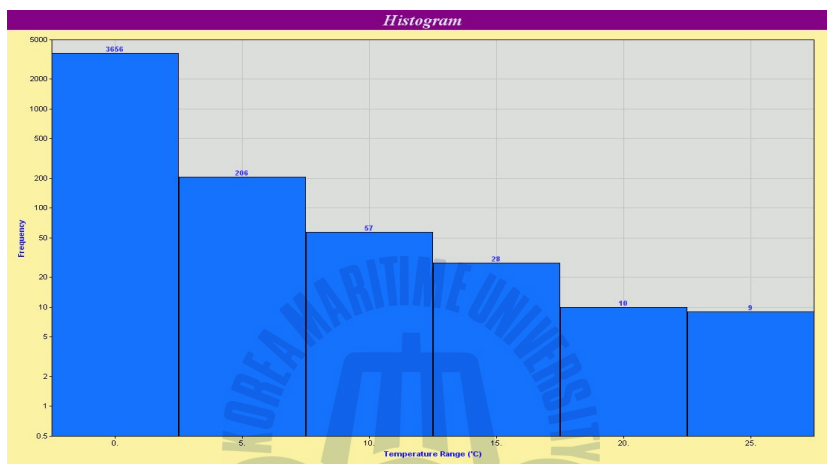
item	90.0~95.0	95.0~100.0	100.0~105.0	105.0~110.0	110.0~115.0	115.0~120.0	계
0.0~ 5.0	4	252	1190	512	1375	323	3,656
5.0~10.0	1	24	58	41	82	0	206
10.0~15.0	1	14	27	13	2	0	57
15.0~20.0	1	6	15	6	0	0	28
20.0~25.0	0	0	9	1	0	0	10
25.0~30.0	0	3	6	0	0	0	9
계	7	299	1,305	573	1,459	323	3,966

(b) 회수관

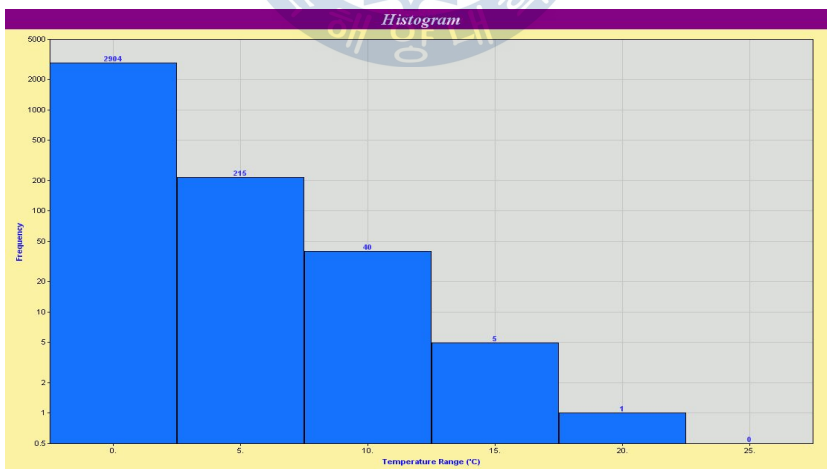
item	30.0~35.0	35.0~40.0	40.0~45.0	45.0~50.0	50.0~55.0	계
00~ 50	393	1340	564	438	169	2,904
50~100	21	90	68	35	1	215
100~150	0	31	4	5	0	40
150~200	0	4	1	0	0	5
200~250	0	0	1	0	0	1
계	414	1,465	638	478	170	3,165

각 대상구역별 공급관 및 회수관에 대한 사이클계수 결과를 토대로 측정온도범위에 따른 히스토그램 및 측정온도범위에 대한 빈도횟수그래프를 산정하였다. 그림 4-1 및 그림 4-2에 표 4-1의 H아파트에 대한 사이클계수결과를 사용하여 도출한 히스토그램 및 빈도그래프를 각각 나타내었다.

다른 아파트에 대한 1년간의 온도측정데이터에 대한 측정온도범위에 따른 히스토그램 및 빈도그래프를 각각 부록 3 히스토그램 및 빈도그래프에 나타내었다. 다른 지역에서의 온도측정데이터 결과도 H아파트에서의 히스토그램 및 빈도그래프의 결과와 유사한 결과를 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

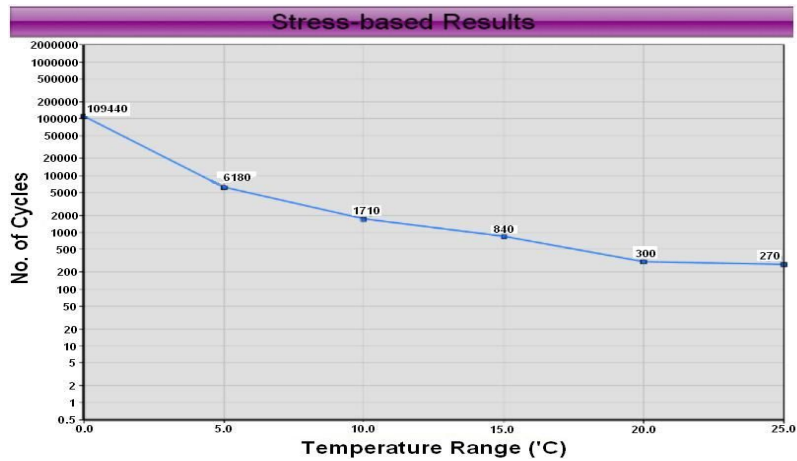


(a) 공급관

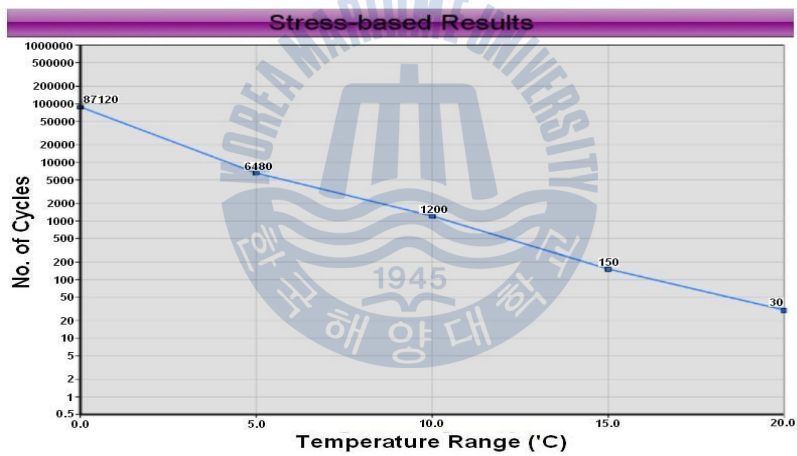


(b) 회수관

그림 4-1 측정온도범위에 대한 히스토그램의 일례 (H아파트)



(a) 공급관



(b) 회수관

그림 4-2 측정온도범위에 대한 빈도그래프의 일례 (H아파트)

지역난방수의 측정 온도데이터의 사이클계수결과를 통하여 열배관의 피로안전성 평가는 2장에서 제시한 사이클기반 및 응력기반 평가법을 실시하였다. 사이클기반 평가법에서는 Cut-off를 실시하지 않았으며, 응력기반 평가법에서는 2장의 그림 2-8에 나타난 EC3의 DC71의 설계피로곡선에서 피로에 영향을 미치지 않는 무한수명으로 판단되는 경우에서 Cut-off를 실시하여 지역난방 열배관의 피로안전성 평가를 실시하였다.

4.2 사이클기반 피로안전성 평가

앞에서 제시한 Rainflow Counting Method를 이용하여 연구대상 열배관에 대한 등가전온도사이클수를 산출하였다. 본문 2.3.2의 식 (2-8)을 이용하여 E아파트 및 H아파트에 대한 1년 동안의 등가전온도사이클수 계산결과의 일례를 표 4-2~표 4-3에 나타내었으며, 그림 4-3에 E아파트에 대한 온도범위에 대한 등가전온도사이클수 계산결과의 일례를 그림으로 나타내었다. 다른 측정지역에 대한 등가전온도사이클수는 부록 4 등가전온도사이클수 결과 및 부록 5 온도범위에 대한 등가전온도사이클수에 나타내었다. 표 4-1의 사이클계수결과를 토대로 세로축은 온도범위를 5℃ 간격으로 분류하였으며, 가로축은 온도범위에 따른 각 측정온도범위에 대한 사이클 수의 합, $b=3\sim5$ 일 때의 각각의 1년 데이터에 대한 등가전온도사이클수를 나타내었다. 본 연구에서는 IEA기준인 $b=3$ 을 적용하였다.

표 4-2 등가전온도사이클수 계산결과의 일례 (E아파트)

(a) 공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	$b = 3.00$	$b = 4.00$	$b = 5.00$
5.0	2487	0.02920	0.00066	0.00002
10.0	200	0.06339	0.00432	0.00029
15.0	78	0.11446	0.01301	0.00148
20.0	37	0.14898	0.02370	0.00377
25.0	28	0.23962	0.04901	0.01003
30.0	20	0.31250	0.07813	0.01953
35.0	14	0.36108	0.10668	0.03152
40.0	14	0.55468	0.18910	0.06446
45.0	14	0.80745	0.31197	0.12053
50.0	14	1.12728	0.48678	0.21020
55.0	43	4.67486	2.23118	1.06488
60.0	22	3.14230	1.64257	0.85862
65.0	19	3.48510	1.98017	1.12510
70.0	8	1.84852	1.13432	0.69606
Total	2998	16.90942	8.25160	4.20649

(b) 회수관

ΔT (°C)	No. of Cycles	$b = 3.00$	$b = 4.00$	$b = 5.00$
5.0	2954	0.03468	0.00079	0.00002
10.0	128	0.04057	0.00277	0.00019
15.0	3	0.00440	0.00050	0.00006
20.0	4	0.01611	0.00256	0.00041
25.0	10	0.08558	0.01750	0.00358
30.0	36	0.56250	0.14063	0.03516
35.0	34	0.87690	0.25908	0.07655
40.0	23	0.91126	0.31066	0.10591
45.0	2	0.11535	0.04457	0.01722
Total	3194	2.64735	0.77906	0.23908

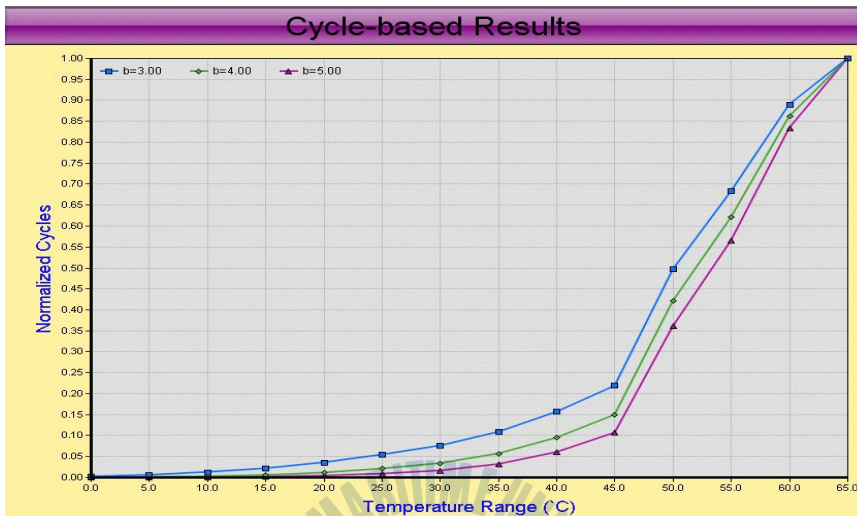
표 4-3 등가전온도사이클수 계산결과의 일례 (H아파트)

(a) 공급관

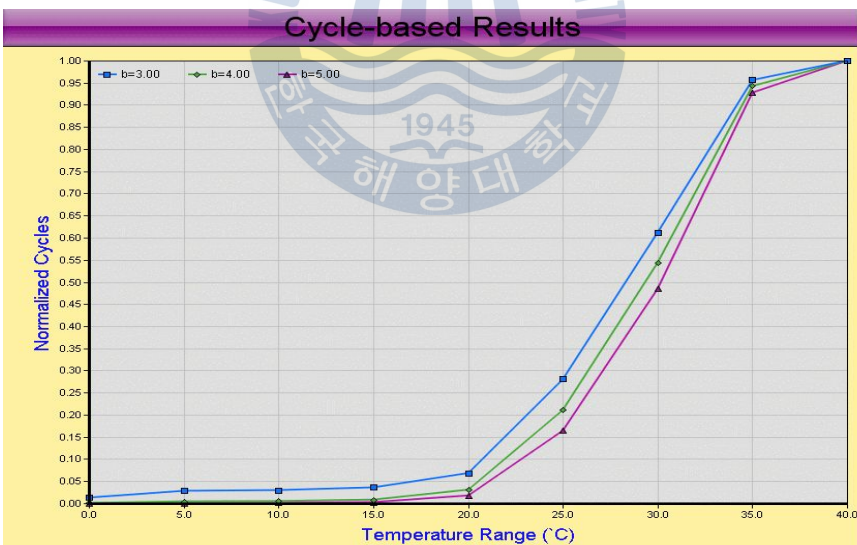
ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	3648	0,04282	0,00097	0,00002
10,0	206	0,06529	0,00445	0,00030
15,0	57	0,08364	0,00950	0,00108
20,0	28	0,11274	0,01794	0,00285
25,0	10	0,08558	0,01750	0,00358
30,0	9	0,14063	0,03516	0,00879
Total	3958	0,53071	0,08553	0,01663

(b) 회수관

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	2904	0,03409	0,00077	0,00002
10,0	216	0,06846	0,00467	0,00032
15,0	40	0,05870	0,00667	0,00076
20,0	5	0,02013	0,00320	0,00051
25,0	1	0,00856	0,00175	0,00036
Total	3166	0,18994	0,01707	0,00196



(a) 공급관



(b) 회수관

그림 4-3 E아파트의 온도범위에 대한 등가전온도사이클수

위와 동일한 계산과정을 통하여 전체 측정대상지역에 대한 등가전온도사이클수에 의한 평가결과를 표 4-4에 나타내었다. 여기서, 등가전온도사이클수 30년값은 1년 결과값을 30년으로 외삽하여 산출하였다.

표 4-4 등가전온도사이클수에 의한 사용자배관의 피로안전성 평가결과

번호	측정위치	배관	등가전온도사이클수(N_0)					
			1년			30년		
			b=3	b=4	b=5	b=3	b=4	b=5
1	E 아파트	S	17	8	4	507	248	126
		R	3	1	0	79	23	7
2	F 아파트	S	9	5	3	277	147	80
		R	0	0	0	8	1	0
3	G 아파트	S	5	2	1	156	60	24
		R	0	0	0	2	0	0
4	H 아파트	S	1	0	0	16	3	0
		R	0	0	0	6	1	0
5	I 아파트	S	10	6	4	309	182	115
		R	6	2	1	190	69	26
6	J 아파트	S	4	2	1	129	51	21
		R	0	0	0	4	0	0

* S : 공급관, R : 회수관

등가전온도사이클수에 기초한 모든 사용자배관에 대한 평가결과, 표 2-7에 나타난 IEA기준 내구연한인 30년 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 사용자배관의 온도 분포가 분배관의 온도특성을 충분히 반영한다는 기준보고로부터 분배관 기준을 적용하여 분배관에 대한 피로평가를 실시하여도 기준을 만족하는 것을 알 수 있다. 이로부터 연구대상 열배관은 공용년수 동안 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

4.3 응력기반 피로안전성 평가

4.3.1 이론식에 의한 평가법

열배관 온도측정 데이터에 대한 Rainflow Counting Method를 이용하여 이론식에 의한 응력기반 피로수명 평가를 실시하였다. 온도데이터를 이용하여 2.3.3의 내용을 기초하여 열응력을 계산하고, 이 결과를 Miner's rule에 적용하여 대상지역 열배관에 대한 응력기반 피로수명 평가를 실시하였다. 표 4-5에 H아파트의 측정데이터로부터 산정된 누적손상도(CDF) 계산 결과의 일례를 나타내었다. 다른 지역에 대한 이론식을 이용한 응력기반 피로수명 계산 결과는 부록 6에 나타내었다. 세로축은 온도범위를 5℃ 간격으로 분류하였으며, 가로축은 온도범위에 따른 30년 기준에 대한 각 온도범위에 대한 사이클 수, S-N선도에서의 응력범위, 응력진폭, 최대허용횟수 및 피로손상도를 나타내었다.

표 4-5 이론식에 의한 누적손상계수 계산결과 일례 (H아파트, 30년)

(a) 공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	109440	5,821	2,910	---	---
10,0	6180	17,477	8,738	---	---
15,0	1710	29,152	14,576	93042107	0,0000183788
20,0	840	40,846	20,423	17229373	0,0000487540
25,0	300	52,559	26,279	4930239	0,0000608490
30,0	270	64,290	32,145	2693908	0,0001002262
Total	118740				0,0002282080

(b) 회수관

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	87120	5,821	2,910	---	---
10,0	6480	17,477	8,738	---	---
15,0	1200	29,152	14,576	93042107	0,0000128974
20,0	150	40,846	20,423	17229373	0,0000087061
25,0	30	52,559	26,279	4930239	0,0000060849
Total	94980				0,0000276885

위에 기술한 계산결과를 이용하여 전체 측정대상지역에 대한 이론식에 의한 응력기반 피로안전성 평가결과를 표 4-6에 나타내었다. 또한 표 4-6의 결과로부터 대상위치의 모든 열배관에 대한 누적손상도는 대상 열배관에 대해 모두 1.0이하의 값으로 나타났다. 이로부터 응력기반에 의한 평가에서도 대상열배관은 모두 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

표 4-6 이론식에 의한 응력기반 피로안전성 평가결과

번호	측정위치	배관	CDF _{1-year}	CDF _{30-years}
1	E 아파트	S	3.97E-04	1.19E-02
		R	6.10E-05	1.83E-03
2	F 아파트	S	2.18E-04	6.55E-03
		R	3.00E-06	9.00E-05
3	G 아파트	S	1.20E-04	3.61E-03
		R	9.67E-08	2.90E-06
4	H 아파트	S	7.60E-06	2.28E-04
		R	9.23E-07	2.77E-05
5	I 아파트	S	2.41E-04	7.24E-03
		R	1.45E-04	4.35E-03
6	J 아파트	S	9.97E-05	2.99E-03
		R	5.10E-07	1.53E-05

* S : 공급관, R : 회수관

4.3.2 유한요소해석에 의한 평가법

열배관의 형상 및 평균온도별 온도변화에 따른 보다 정확한 응력을 계산하기 위해 유한요소해석을 이용한 응력기반 피로수명 평가를 실시하였다. 여기에서는 열배관이 강재인 것을 고려하여 Von Mises이론의 유효응력(Effective Stress)으로 응력범위를 산출하였으며, 공용년수 30년에 대한 누적손상도를 계산하여 피로안전성 평가를 실시하였다(김주용 등(2009)).

해석프로그램 LUSAS Ver. 14.3(2010)을 사용하였으며 3차원 솔리드 요소로 해석을 실시하였다. 요소크기는 관의 두께와의 형상비를 고려하여 대상부위에는 최소 1mm로 하였으며, 배관길이가 대상부위의 응력에 미치는 영향을 배제하기 위해 배관의 길이 대 직경의 비율(L/d, L: Length, d: diameter)은 10을 적용하였다. 해석모델의 경계조건은 실제 구조물의 설치상태와 하중 작용상태를 최대한 반영하여 설정하였다. 열

배관을 축방향으로는 구속시키고 반경방향으로는 자유롭게 변형될 수 있도록 하여, 반경방향으로의 수축과 팽창을 반영할 수 있도록 하였다.

해석모델에 대한 제원은 KS규격 압력배관용 탄소강관을 참고하여 표 4-7에 나타내었으며, 해석모델 형상 및 해석결과의 일례를 그림 4-4~그림 4-6에 나타내었다.

표 4-7 해석모델 제원

번호	측정위치	배관규격	재 질	내 관(mm)		길 이 (mm)	기 타
				두께	외경		
1	E 아파트	65A	SPPS 370	4.5	76.3	763	배관의 길이/직경 비율 (L/d) : 10 적용
2	F 아파트	65A	SPPS 370	4.5	76.3	763	
3	G 아파트	80A	SPPS 370	4.5	89.1	891	
4	H 아파트	65A	SPPS 370	4.5	76.3	763	
5	I 아파트	80A	SPPS 370	4.5	89.1	891	
6	J 아파트	80A	SPPS 370	4.5	89.1	891	

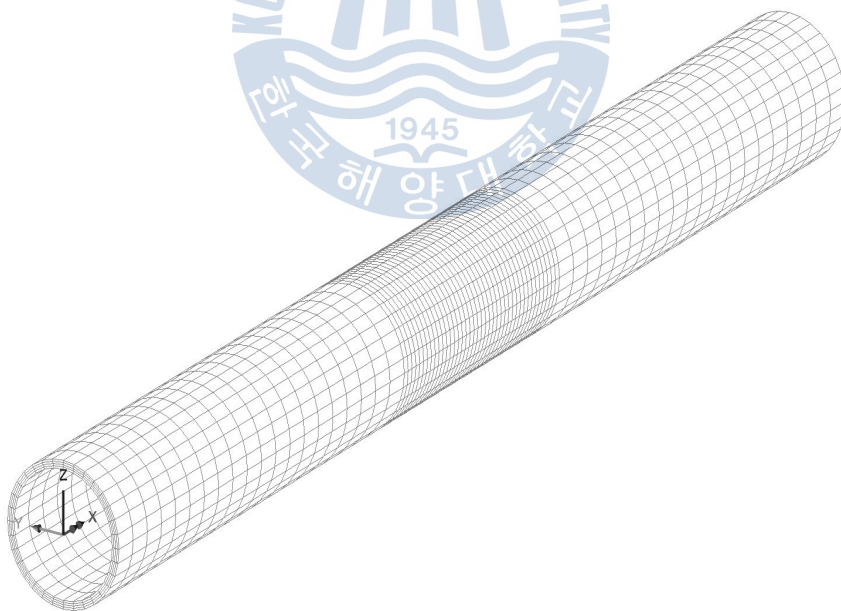
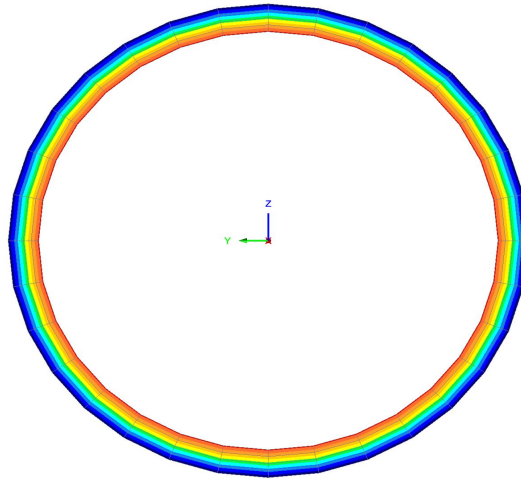


그림 4-4 해석모델 형상

Loadcase: 2:Loadcase 2
 Results file: Pipe(65A)-coupled-3_therm.mys
 Entity: Potential
 Component: PHI

105.152
105.737
106.321
106.905
107.489
108.073
108.658
109.242
109.826

Maximum 110.0 at node 66
 Minimum 104.742 at node 7772

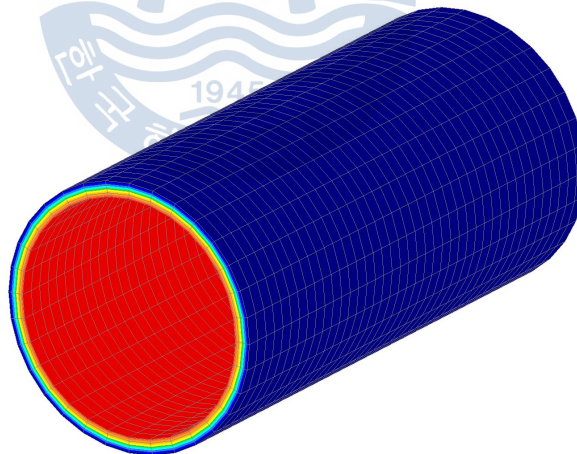


(a) 2D 모형

Loadcase: 2:Loadcase 2
 Results file: Pipe(65A)-coupled-3_therm.mys
 Entity: Potential
 Component: PHI

105.152
105.737
106.321
106.905
107.489
108.073
108.658
109.242
109.826

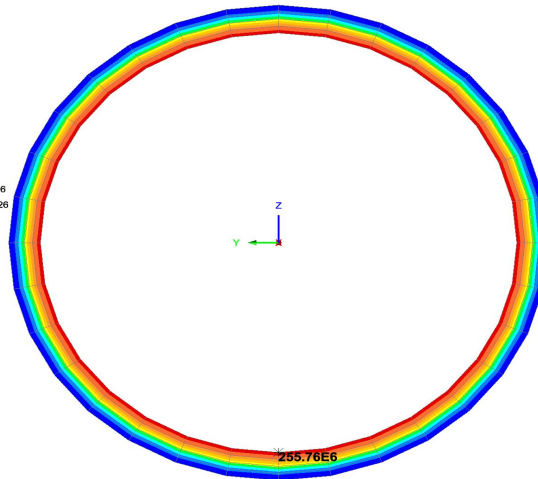
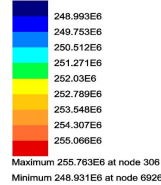
Maximum 110.0 at node 66
 Minimum 104.742 at node 7772



(b) 3D모형

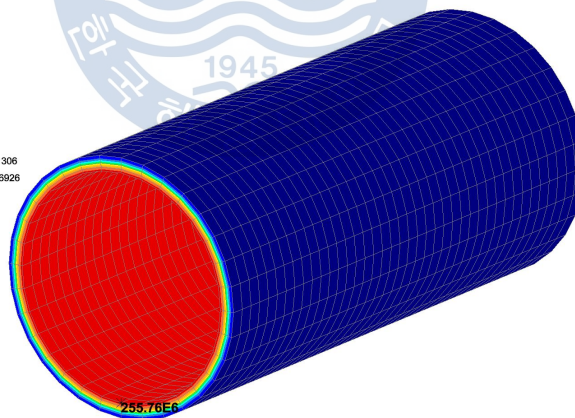
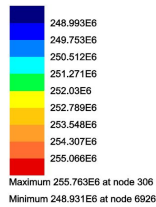
그림 4-5 열전달해석 결과 일례 (65A)

Loadcase: 1:Loadcase 1
Results file: Pipe(65A)-coupled-3_struct.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SE



(a) 2D 모형

Loadcase: 1:Loadcase 1
Results file: Pipe(65A)-coupled-3_struct.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SE



(b) 3D 모형

그림 4-6 열응력해석 결과 일례 (65A)

표 4-8에 유한요소해석을 통한 개별온도사이클 및 등가전온도사이클에 대한 응력기반 누적손상도 평가결과를 나타내었다. 부록 8.2 및 8.3에 각 측정 대상지역에 대해 유한요소해석 결과에 기초하여 개별온도사이클 및 등가전온도사이클 개념을 적용한 누적손상도 계산 결과를 나타내었다.

여기서 개별온도사이클에 대한 누적손상도는 Rainflow Matrix에서 각각의 평균온도와 온도변동범위에 대해 부록 8.1에 나타난 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위에 대해 산정된 반복횟수를 기준으로 하고, 각 응력범위의 측정횟수에 대한 누적손상도를 산정한 것이다. 등가전온도사이클에 대한 누적손상도는 전체 측정온도데이터의 평균온도와 대상열배관의 기준온도인 110℃를 기준으로 하여 산정된 반복횟수에 대해 표 4-4의 $b=3$ 의 30년의 등가전온도사이클수를 적용하여 계산하였다. 개별온도사이클에 대한 누적손상도는 일반적인 S-N선도에서 Miner's Rule에 해당하는 개념이며, 등가전온도사이클에 대한 누적손상도는 등가응력범위에 대한 개념과 유사하다.

유한요소해석을 이용한 응력기반 평가결과, 모든 데이터 측정위치에서 Miner's rule에 의한 누적손상도의 모든 계산결과가 1.0이하의 값을 만족하는 것으로 나타났다. 개별온도사이클과 등가전온도사이클에 대한 평가법에 따라 다소의 차이가 발생하였으나 그 차이는 피로안전성 평가에 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 또한 이론식을 이용한 응력기반 누적손상도와 비교하여 볼 때 대체로 그 값은 유사한 것으로 나타났다. 다만, 일부에서 다소 큰 차이를 나타내었으나, 대상 열배관의 피로수명이 크게 안정적인 값을 나타내므로 그 차이가 피로안전성 평가에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

표 4-8 유한요소해석을 이용한 응력기반 누적손상도 평가결과 (30년)

번호	측정위치	배관	개별온도사이클	등가전온도사이클
1	E 아파트	S	1.22E-02	1.13E-02
		R	1.90E-03	1.74E-03
2	F 아파트	S	7.77E-03	6.16E-03
		R	1.41E-04	1.76E-04
3	G 아파트	S	3.85E-03	3.49E-03
		R	1.54E-06	4.38E-05
4	H 아파트	S	3.06E-04	3.61E-04
		R	3.23E-05	1.32E-04
5	I 아파트	S	7.40E-03	6.91E-03
		R	4.52E-03	4.19E-03
6	J 아파트	S	3.21E-03	2.87E-03
		R	1.89E-05	8.77E-05

* S : 공급관, R : 회수관

4.4 소결

본 연구에서의 연구 대상지역에서 측정된 열배관의 온도측정 데이터의 사이클 계수, 측정온도범위에 따른 히스토그램 및 빈도횟수그래프를 산정하고, 이에 기초하여 사이클기반 및 응력기반 피로안전성 평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 온도측정 데이터의 사이클 계수, 측정온도범위에 따른 히스토그램 및 빈도횟수그래프를 평가한 결과, 공급관 및 회수관의 측정온도범위는 약간 차이를 나타내고 있으나 공급관은 100~105℃, 회수관은 40~45℃가 가장 많은 것으로 나타났다. 대상 측정온도데이터는 사용자배관에서 측정하였으나, 열원에서 공급되는 공용온도조건과 비교하였을 때, 주배관 및 분배관의 온도특성과 유사한 패턴을 가지고 있는 것으로 판단된다.

2) 전체 측정대상지역에 대한 등가전온도사이클수에 기초한 모든 사용자배관에 대한 사이클기반 피로안전성 평가결과, IEA 내구연한 30년 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 사용자배관의 온도분포가 분배관의 온도특성을 충분히 반영한다는 기존보고로부터 분배관 기준을 적용하여 분배관에 대한 피로평가를 실시하여도 기준을 만족하는 것을 알 수 있다. 이로부터 연구대상 열배관은 공용년수 동안 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

3) 전체 측정대상지역에 대한 이론식 및 유한요소해석에 기초한 응력기반 피로안전성 평가결과, 평가 대상위치의 모든 열배관에 대한 누적손상도는 대상 열배관에 대해 모두 1.0이하의 값으로 나타났다. 이로부터 응력기반에 의한 평가에서도 대상열배관은 모두 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

5장 열배관 부속설비(Fitting류)의 영향

5.1 개요

5.2 Elbow형 열배관에 대한 응력기반평가

5.3 Tee형 열배관에 대한 응력기반평가

5.4 소결



5장 열배관 부속설비(Fitting류)의 영향

5.1 개요

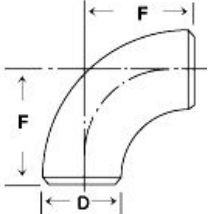
배관기하형상에 따른 유한요소해석을 실시하여 열배관의 부속설비(pipe-fittings)에 대한 영향을 분석하였다. 배관의 기하형상은 Elbow형과 Tee형을 대상으로 앞 장에서 분석한 평균온도별 온도변화를 매개변수로 하여 유한요소해석을 실시하였으며, Rainflow Matrix에서 산정된 등가전온도사이클에 대해 누적피로손상도를 평가하였다.

5.2 Elbow형 열배관에 대한 응력기반평가

표 5-1의 Elbow 열배관의 제원을 대상으로 평균온도별 온도변화를 매개변수로 하여 유한요소해석을 실시하였다. 그림 5-1에 해석모형을 나타내었으며, 그림 5-2에 열응력 해석결과의 일례를 나타내었다.

Elbow 열배관의 해석모형은 3차원 솔리드요소를 적용하였으며, 경계조건은 열배관의 단부에 변위를 구속하여 적용하였다.

표 5-1 Elbow형 열배관의 제원 일례

구 분	규 격	D 외부직경(mm)	F 중심으로부터 거리(mm)
	65A	76.3	95.3

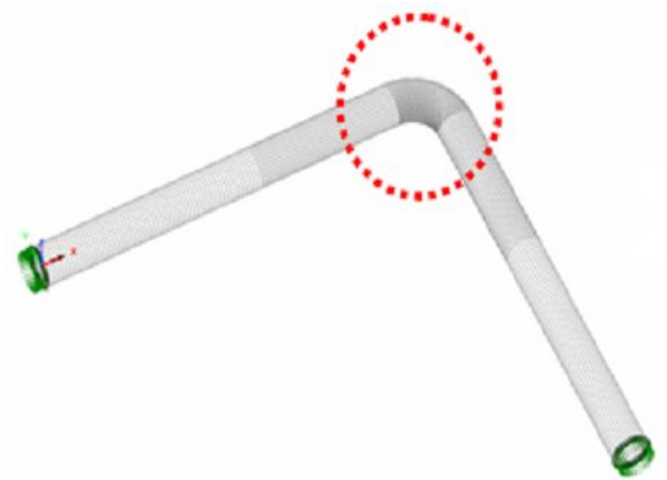
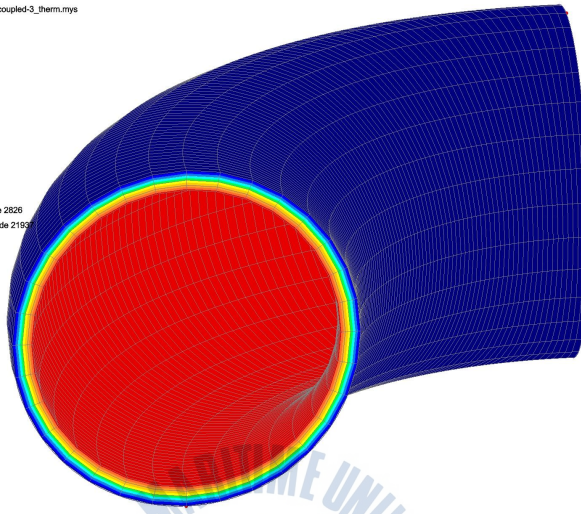


그림 5-1 해석모델 형상

Loadcase: 2:Loadcase 2
 Results file: Pipe(65A)-coupled-3_them.mys
 Entity: Potential
 Component: PHI

107.476
107.773
108.07
108.367
108.664
108.961
109.258
109.554
109.851

Maximum 110.0 at node 2826
 Minimum 107.328 at node 2193

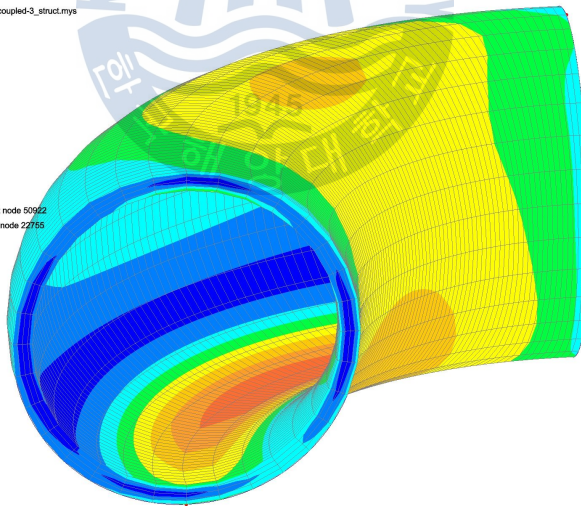


(a) 열전달해석

Loadcase: 1:Loadcase 1
 Results file: Pipe(65A)-coupled-3_struct.mys
 Entity: Stress - Solids
 Component: SE

11.2546E6
22.5091E6
33.7637E6
45.0183E6
56.2728E6
67.5274E6
78.7819E6
90.0365E6
101.291E6

Maximum 102.772E6 at node 50962
 Minimum 1.48126E6 at node 22755



(b) 열응력해석

그림 5-2 열응력해석 결과 일례 (65A)

표 5-2에 Elbow형 열배관의 등가전온도사이클 수에 대한 누적손상도 평가결과를 나타내었다. 부록 9.1에 Elbow형 열배관에 대해 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위 및 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 계산 결과를 나타내었다.

Elbow형 열배관에 대한 유한요소해석 결과, 모든 데이터 측정위치에서 누적손상도는 1.0이하의 값을 나타내어 모든 평가 위치에서 소정의 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

표 5-2 Elbow형 열배관의 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 평가결과

번호	측정위치	배관	누적손상도 (30년)
1	E 아파트	S	7.02E-04
		R	1.13E-04
2	F 아파트	S	3.86E-04
		R	1.14E-05
3	G 아파트	S	2.14E-04
		R	2.89E-06
4	H 아파트	S	2.17E-05
		R	8.61E-06
5	I 아파트	S	4.25E-04
		R	2.71E-04
6	J 아파트	S	1.80E-04
		R	5.74E-06

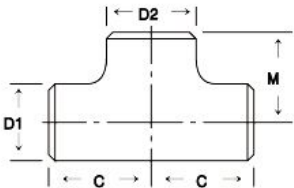
* S : 공급관, R : 회수관

5.3 Tee형 열배관에 대한 응력기반평가

표 5-3의 Tee형 열배관의 제원을 대상으로 평균온도별 온도변화를 매개변수로 하여 유한요소해석을 실시하였다. 그림 5-3에 해석모델을 나타내었으며, 그림 5-4에 열응력 해석결과의 일례를 나타내었다.

Tee형 열배관의 해석모델은 3차원 솔리드요소를 적용하였으며, 경계조건은 열배관의 단부에 변위를 구속하여 적용하였다.

표 5-3 Tee형 열배관의 제원

구 분	규 격	외부직경(mm)		중심으로부터 거리 (mm)	
		D1	D2	C	M
	65A-50A	76.3	60.5	63.5	63.5
	65A-65A	76.3	76.3	76.2	76.2

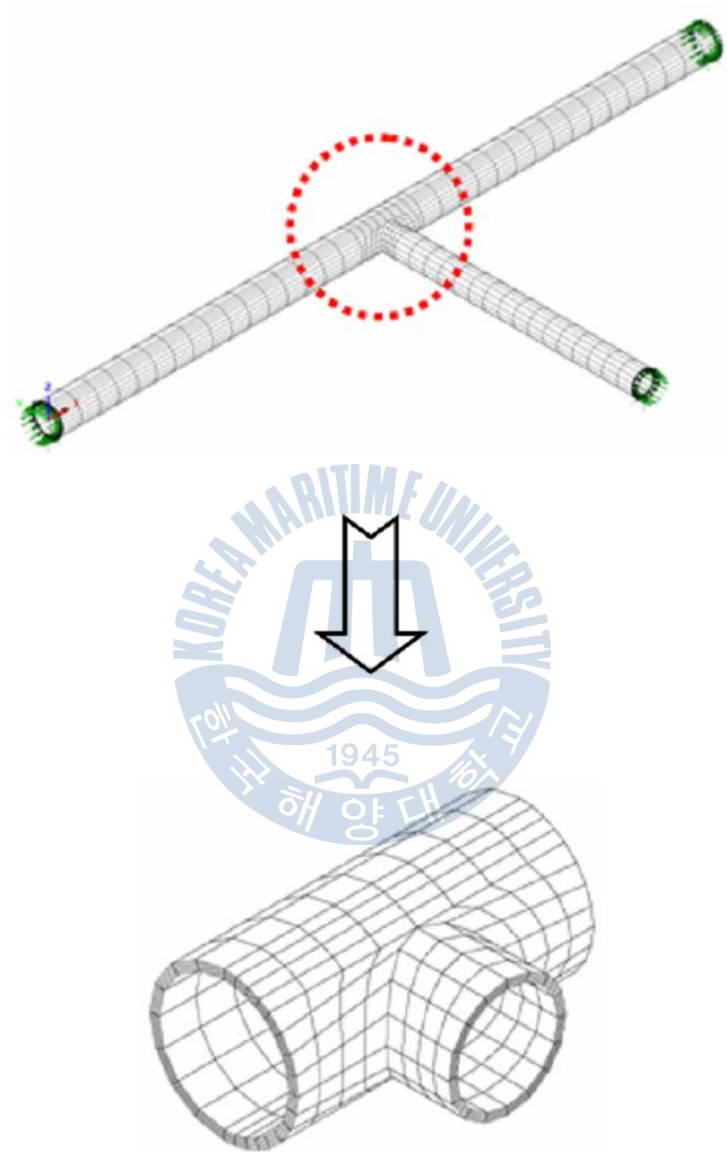
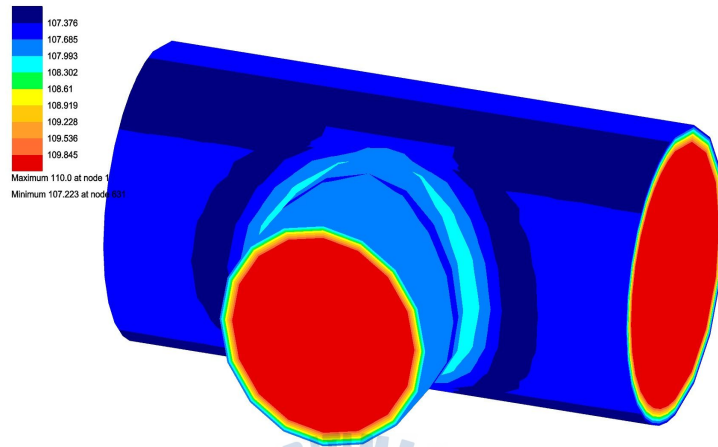


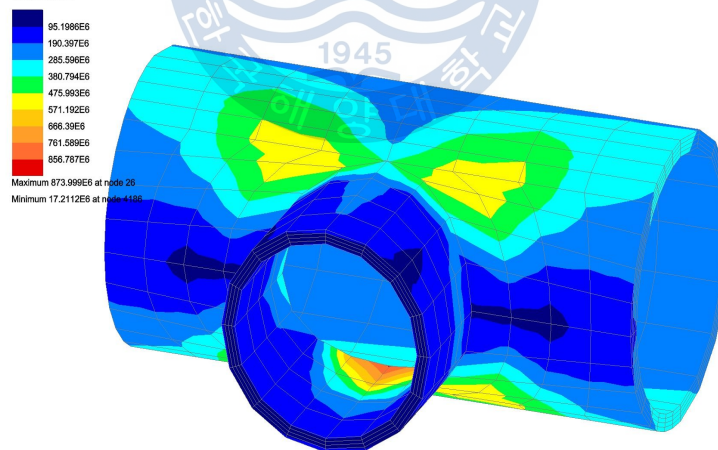
그림 5-3 해석모델 형상 일례 (65A-50A)

Loadcase: 2:Loadcase 2
Results file: Pipe(65A)-coupled-4_therm.mys
Entity: Potential
Component: PHI



(a) 열전달해석

Loadcase: 1:Loadcase 1
Results file: Pipe(65A)-coupled-4_struct.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SE



(b) 열응력해석

그림 5-4 열응력해석 결과 일례 (65A-50A)

Elbow형과 Tee형을 대상으로 평균온도별 온도변화를 매개변수로 하여 유한요소해석을 실시하여 배관의 기하형상에 따른 열응력범위를 산출하여 배관의 기하형상에 따른 열응력을 분석하였다. 해석결과, 동일한 평균응력 및 온도변화에 대해서는 Elbow형 열배관에 비하여 Tee형 열배관의 열응력범위가 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 Tee형 열배관에서도 기하형상의 변화가 클수록 열응력범위가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

표 5-4에 Tee형 열배관의 등가전온도사이클 수에 대한 누적손상도 평가결과를 나타내었다. 부록 9.2에 Tee형 열배관 65A-50A 및 65A-65A에 대해 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위 및 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 계산 결과를 나타내었다.

Tee형 열배관에 대한 유한요소해석 결과, 모든 데이터 측정위치에서 누적손상도는 1.0이하의 값을 나타내어 모든 평가 위치에서 소정의 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

표 5-4 Tee형 열배관의 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 평가결과

번호	측정위치	배관	누적손상도 (30년)	
			65A-50A	65A-65A
1	E 아파트	S	4.47E-01	1.01E-01
		R	6.79E-02	1.55E-02
2	F 아파트	S	2.43E-01	5.51E-02
		R	6.87E-03	1.57E-03
3	G 아파트	S	1.38E-01	3.14E-02
		R	1.71E-03	3.90E-04
4	H 아파트	S	1.43E-02	3.24E-03
		R	5.14E-03	1.17E-03
5	I 아파트	S	2.73E-01	6.20E-02
		R	1.64E-01	3.73E-02
6	J 아파트	S	1.13E-01	2.57E-02
		R	3.42E-03	7.81E-04

* S : 공급관, R : 회수관

5.4 소결

Elbow형과 Tee형의 배관기하형상에 따른 Fitting류에 대한 영향을 분석하기 위하여 평균온도별 온도변화를 매개변수로 하여 유한요소해석을 실시하였으며, Rainflow Matrix에서 산정된 등가전온도사이클에 대해 누적피로손상도를 평가하였다.

1) Elbow형과 Tee형을 대상으로 평균온도별 온도변화를 매개변수로 하여 유한요소해석을 실시하여 배관의 기하형상에 따른 열응력범위를 산출하여 배관의 기하형상에 따른 열응력을 분석하였다. 해석결과, 동일한 평균응력 및 온도변화에 대해서는 Elbow 열배관에 비하여 Tee형 열배관의 열응력범위가 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 Tee형 열배관에서도 기하형상의 변화가 클수록 열응력범위가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

2) Elbow형 및 Tee형 열배관에 대한 유한요소해석 결과, 모든 데이터 측정위치에서 누적손상도는 1.0이하의 값을 나타내어 모든 평가 위치에서 소정의 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.



6장 회수온도 변화에 따른 열배관의 안전성 평가

6.1 개요

6.2 회수온도 변화에 따른 활동길이 및 신축량 검토

6.3 회수온도 변화에 따른 안전성

6.4 소결



6장 회수온도 변화에 따른 열배관의 안전성 평가

6.1 개요

열배관의 회수온도 한계를 규명하기 위해 2003년 이전에 설치한 열배관과 2003년 이후에 설치한 열배관의 시공법에 따른 여러 특성을 비교하여 표 6-1에 나타내었으며, 열배관의 회수온도 한계규명을 위해 활동길이, 신축량 및 허용응력 검토를 실시하였다.

표 6-1에 나타낸 것과 같이 지역난방시스템 도입 초기에는 열배관 강관 허용응력을 127MPa로 기준하여 $\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$ 로부터 ΔT 는 약 50℃로 계산되지만 좀 더 보수적으로 40℃로 설정하였다. 그러나 2003년 이후 전기예열공법을 도입하면서 유럽에서 적용되고 있는 안전율을 재조사하여 1.2로 하향 조정하였으며, 이로부터 65℃로 예열을 실시한 후 허용응력 범위인 ΔT 를 55℃로 배관 허용온도를 설정한 것으로 조사되었다.

표 6-1 관경별 활동길이 및 신축량 비교 (강종 : SPPS 370)

구 분	2003년 이전 설치 열배관	2003년 이후 설치 열배관
예열온도	80℃	65℃
ΔT	40℃	55℃
강관 안전율	1.5	1.2
허용응력	127 MPa	154 MPa
배관거동 허용온도	120 ~ 40℃	120 ~ 10℃
예열방법	온수예열	전기예열

6.2 회수온도 변화에 따른 활동길이 및 신축량 검토

지하에 실제로 매설된 열배관은 최고온도와 최저온도로 반복하는 온도이력을 받는 것이 아니라 이 범위 내의 작은 온도차이의 많은 반복 사이클을 받게 되며 말단의 축방향 반력, 각 구간별 마찰력의 크기, 분포 등으로 인해 복잡성을 띠게 된다.

따라서 온도변화에 따른 각 관경별 활동길이(L_f) 및 신축량(ΔL_f)을 산정하였다. 그림 6-1과 같이 매설 열배관의 한쪽 단부에 팽창부가 있고 반대쪽은 무한히 긴 경우, 열배관의 온도내압, 주변 토사의 구속력에 따라 팽창부에 연결된 일부구간은 활동하게 되고 나머지 구간은 구속상태에 있게 된다.

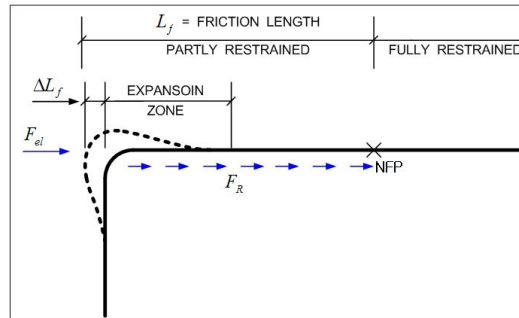


그림 6-1 매설 열배관의 온도증가시 거동

따라서 2003년 이전 기준인 온도변화(ΔT) 40℃의 경우, 기존 열작용력 관련 계산식을 적용하여 활동길이를 산출하였으며, 회수온도 변화에 따른 온도변화(ΔT) 50℃(회수온도 30℃) 및 60℃(회수온도 20℃)에 대해서는 현재 국내에서 적용되는 유럽기준(EN13941)을 적용하여 산출하였다. 환경별 활동길이 및 신축량 적용기준을 표 6-2에 나타내었다.

표 6-2의 환경별 활동길이 및 신축량 적용기준을 이용하여 회수온도 변화시 환경별 활동길이 및 신축량을 표 6-3에 나타내었다. 표 6-3에 나타낸 바와 같이 열배관의 회수온도 변화(40℃에서 30℃, 20℃로 저감)로 인한 열배관의 활동길이 및 신축량의 변화는 회수온도 40℃와 비교할 때 회수온도 30℃의 경우 활동길이가 65~71%, 신축량은 2~3%정도 증가되는 것으로 나타났으며, 회수온도 20℃의 경우 활동길이는 98~106%, 신축량은 48~50%정도 증가되는 것으로 나타났다.

한편, 국내에서 사용되는 L자형 벤드의 경우 이중보온관을 흡수하기 위한 폼패드의 최대 신축량은 50mm로 제한하고 있기 때문에 이와 같이 증가된 신축량과 활동길이 때문에 기 설치된 열배관에서는 이들 영향을 충분히 흡수할 수 없으며 피로파괴의 원인이 될 수 있어 요구된 기대수명(30년)을 현저히 단축시킬 우려가 있을 것으로 판단된다.

표 6-2 관경별 활동길이 및 신축량 적용기준

기존 열 작용력 계산식	<ul style="list-style-type: none"> - 단위 길이당 마찰력 $F_R = \mu \cdot \gamma_s \cdot Z \cdot \pi \cdot D_c$ <ul style="list-style-type: none"> - 활동길이 $L_f = \frac{E \cdot A_s \cdot \alpha \cdot \Delta T}{F_R}$ <ul style="list-style-type: none"> - 말단의 신축량 $\Delta L_f = \alpha \cdot \Delta T \cdot L_f$
현 적용 식 (EN139 41)	<ul style="list-style-type: none"> - 단위 길이당 마찰력 $F_R = \mu [\gamma_s \cdot Z \cdot \pi \cdot D_c \cdot \frac{1+K_0}{2} + G - \gamma_s \cdot \pi \cdot (\frac{D_c}{2})^2]$ <ul style="list-style-type: none"> - 활동길이 $L_f = \frac{E \cdot A_s \cdot \alpha \cdot \Delta T + F_p(1-2\nu) - F_{el}}{F_R}$ <ul style="list-style-type: none"> - 말단의 신축량 $\Delta L_f = \frac{F_R \cdot L_f^2}{2E \cdot A_s}$
수 식 기 호	<p>μ : 토사와 PE 외관 사이의 마찰계수 (0.4 적용)</p> <p>γ_s : 토사의 습윤 단위체적 중량 ($\approx 18 \text{ kN/mm}^3$)</p> <p>$Z$: $H + D_c / 2$ (관 중심으로부터의 토피)</p> <p>D_c : PE 외관 직경</p> <p>E : $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (탄소강의 탄성계수)</p> <p>α : $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (탄소강의 선팽창계수)</p> <p>ΔT : 온도변화</p> <p>K_0 : 정지토압계수 (0.5 적용)</p> <p>G : 난방수를 포함한 강관의 유효자중</p> <p>ν : 탄소강의 포아송비 (0.3 적용)</p> <p>A_s : 강관의 단면적</p> <p>F_p : 내압으로 인한 축 방향 팽창력</p> <p>F_{el} : 팽창부의 축방향 반력</p>

표 6-3 회수온도 변화시 관경별 활동길이 및 신축량 비교

관규격	활동길이 (m)			신축량 (mm)		
	기존	회수온도 변경시		기존	회수온도 변경시	
	40℃	30℃	20℃	40℃	30℃	20℃
850A	66	112	136	32	33	47
800A	67	114	137	32	33	48
750A	68	115	139	33	34	49
700A	69	117	141	33	34	50
650A	70	118	143	34	35	50
600A	71	120	145	34	35	51
550A	72	122	146	35	36	52
500A	73	123	148	35	36	53
450A	75	125	150	36	37	53
400A	76	126	152	36	37	54
350A	77	128	154	37	38	55
300A	68	113	136	33	34	48
250A	66	110	132	32	33	47
200A	59	98	118	28	29	42
150A	52	86	103	25	25	37
125A	47	78	93	23	23	33
100A	47	78	94	23	23	33
80A	44	73	87	21	22	31
65A	44	73	87	21	22	31
50A	40	66	79	19	20	28
40A	36	60	72	17	18	26
32A	36	60	72	17	18	26
25A	33	54	65	16	16	23
20A	28	47	56	14	14	20

* 토피고 : 1.2m 기준

6.3 회수온도 변화에 따른 안전성

직선열배관에서는 식 (6-1)과 같이 허용응력에 대한 온도변화 검토결과, 2003년 이전 설치 열배관은 회수온도를 30℃이하로 하강시킬 경우 구속구간에서 과도한 축응력으로 인해 열배관의 허용응력을 초과할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{\sigma_{x,allow}}{E\epsilon} = \frac{127}{2.1 \times 1.2} \approx 50^{\circ}\text{C} \quad \text{식 (6-1)}$$

또한 열배관의 기하형상에 따른 허용응력 검토를 위해 Tee형 열배관에 대해 유한요소해석을 실시하였다. Elbow형 열배관보다 Tee형 열배관이 동일한 온도변화에 비해 응력집중이 많이 발생하므로 구조대상으로 선정하였으며, 대상모델의 경계조건은 실제 모델의 길이를 적용하여 스프링계수($1.18 \times 10^{11} \text{N/m}^2$)를 적용하였다.

해석 결과의 일례로서 그림 6-2에 회수온도 변화에 따른 열응력 분포 일례(65A-50A), 표 6-4에 회수온도 변화에 따른 열응력 해석결과 (65A-50A)을 나타내었다.

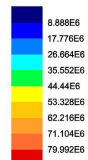
해석결과 기준온도에 대한 회수온도 40℃의 경우 기준 열배관의 허용응력을 만족하는 것으로 나타났으나, 기준온도에 대한 회수온도 30℃의 경우 허용응력을 초과하는 것으로 나타나 회수온도는 40℃가 타당한 것으로 판단된다.

표 6-4 회수온도 변화에 따른 열응력 해석결과 (65A-50A)

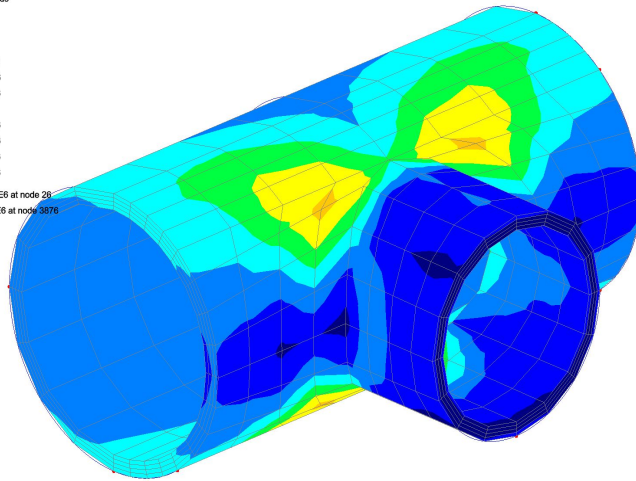
(MPa)				
구 분	발생응력	응력범위	허용응력	해석결과
회수온도 30℃	81.7	132.4	127.0	N.G
회수온도 40℃	108.2	105.9		O.K
회수온도 50℃	134.6	79.5		O.K
기준온도(80℃)	214.1	0.0	-	-

그리고 기존연구(한국지역난방기술(주), 2008)에서도 구조해석 결과, 11.25°, 22.5° Bend의 양쪽방향에 직선 배관이 설치된 경우 강관 및 보온재의 허용응력범위를 크게 초과하며 30년 기대수명 이전에 구조적 문제를 야기시킬 수 있다고 연구된 바, 회수온도는 40℃로 제한하는 것이 타당하다고 판단된다.

Loadcase: 1: Loadcase 1
Results file: Pipe(65A)-coupled-4_struct.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SE

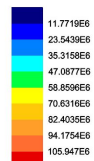


Maximum 81.6803E6 at node 26
Minimum 1.68831E6 at node 3876

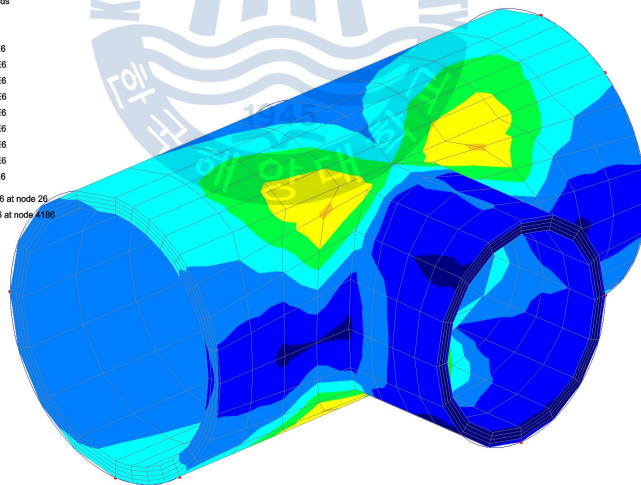


(a) 회수온도 30℃

Loadcase: 1: Loadcase 1
Results file: Pipe(65A)-coupled-4_struct.mys
Entity: Stress - Solids
Component: SE



Maximum 108.16E6 at node 26
Minimum 2.2124E6 at node 4186



(b) 회수온도 40℃

그림 6-2 회수온도 변화에 따른 열응력 분포 일례 (65A-50A)

6.4 소결

열배관의 회수온도 한계규명을 위해 활동길이, 신축량 및 허용응력 검토를 실시하고, 이에 따른 열배관의 적절한 회수온도를 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 열배관의 회수온도 변화(40℃에서 30℃, 20℃로 하강)로 인한 열배관의 활동길이 및 신축량의 변화는 회수온도 40℃와 비교할 때 회수온도 30℃의 경우 활동길이가 65~71%, 신축량은 2~3%정도 증가되는 것으로 나타났으며, 회수온도 20℃의 경우 활동길이는 98~106%, 신축량은 48~50%정도 증가되는 것으로 나타났다.

2) 해석결과 기준온도에 대한 회수온도 40℃의 경우 기존 열배관의 허용응력을 만족하는 것으로 나타났으나 기준온도에 대한 회수온도 30℃의 경우 허용응력을 초과하는 것으로 나타나 활동길이, 신축량, 허용응력을 종합하여 볼 때 회수온도는 40℃가 타당한 것으로 판단된다.



7장 결론

7.1 결론

7.2 향후 과제



7장 결론

7.1 결론

본 연구에서는 지역난방수 온도변화가 지역난방 열배관 피로수명에 미치는 영향을 평가하기 위해 공용중인 열배관에 대한 현장계측 된 온도이력데이터를 분석하였다. 또한 분석자료를 기초로 기존 열배관에 대한 사이클기반 피로평가법 및 응력기반 피로평가법에 의한 열배관 피로안전성을 평가하였으며, 회수온도 변화에 따른 기존 열배관의 안전성 평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존 연구에서의 실측 데이터 분석결과, 열배관 종류에 따른 데이터 측정위치 및 사용자배관의 공용조건에 따라 열배관의 온도변화경향은 다양한 특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

2) 본 연구에서의 사용자 배관을 대상으로 한 1년간의 온도측정 데이터 분석결과, 측정 대상지역의 열배관 사용 특성에 따라 지역난방공사에서 관리하는 분배관의 온도특성 및 사용자 배관의 사용특성 등이 반영되고 있는 것으로 나타났다. 또한 연구대상 계측장소에서는 하절기에 휴지기 현상은 나타나지 않았으나, 일부 측정데이터의 경우에는 사용환경의 영향으로 큰 온도변화가 주기적으로 나타나 온도응력에 의한 피로검토가 필요한 것으로 조사되었다.

3) 온도측정 데이터의 사이클 계수, 측정온도범위에 따른 히스토그램 및 빈도횟수그래프를 평가한 결과, 공급관 및 회수관의 측정온도범위는 약간 차이를 나타내고 있으나 공급관은 100~105℃, 회수관은 40~45℃가 가장 많은 것으로 나타났다.

4) 전체 측정대상지역에 대한 등가전온도사이클수에 기초한 모든 사용자배관에 대한 사이클기반 피로안전성 평가결과, IEA 내구연한 30년 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 이론식 및 유한요소해석에 기초한 응력기반 피로안전성 평가결과, 평가 대상 위치의 모든 열배관에 대한 누적손상도는 전부 1.0이하의 값으로 나타났다. 이로부터 응력기반에 의한 평가에서도 대상열배관은 모두 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

5) Elbow형과 Tee형을 대상으로 평균온도별 온도변화를 매개변수로 하여 유한요소해석을 실시하여 배관의 기하형상에 따른 열응력범위를 산출하고 배관의 기하형상에 따른 열응력을 분석한 결과 동일한 평균응력 및 온도변화에 대해서는 Elbow형 열배관에 비하여 Tee형 열배관의 열응력범위가 크게 나오는 것을 알 수 있었으며 동일한 Tee형 열배관에서도 기하형상의 변화가 클수록 열응력범위가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

또한 Elbow형 및 Tee형 열배관에 대한 유한요소해석 결과, 모든 데이터 측정위치에서 누적손상도는 1.0이하의 값을 나타내어 모든 평가 위치에서 소정의 피로안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

6) 열배관의 회수온도 한계규명을 위해 활동길이, 신축량 및 허용응력 검토 결과, 기준 온도에 대한 회수온도 40℃의 경우 기존 열배관의 허용응력을 만족하는 것으로 나타났으나 기준온도에 대한 회수온도 30℃ 및 20℃의 경우 활동길이, 신축량이 늘어나 이미 설치된 Tee 및 밴드 부위의 폼패드 기준을 초과 할 수 있으며, 허용응력을 초과하는 것으로 나타나 종합적으로 회수온도는 40℃가 타당한 것으로 판단된다.

7.2 향후 과제

지역난방 열배관의 안전성 향상을 위해서는 향후 다음과 같은 분야에서 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

1) 등가전온도사이클수에 의한 피로안전성 평가시 적용되는 기준온도(ΔT_{ref}) 및 매개변수의 적정값에 대한 재해석이 필요 할 것으로 생각된다.

2) 지역난방 열배관의 설치기준(강관안전율, 허용축응력, 예열온도 및 허용온도변화값, 배관거동 허용온도, 예열방법 등)이 변경된 2003년 이후 매설된 열배관의 온도변화에 따른 안전성 평가연구가 필요 할 것으로 판단된다.

3) 열배관의 한계수명이 늘어나고 있는 추세이므로 응력, 피로 또는 부식피로 등의 종합적인 원인에 대한 한계수명과 수명연장 방안에 대한 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

4) 열배관의 수명연장 방안중 하나로 거론되는 공급관과 회수관의 교차 사용시 문제점 및 시범사업에 대한 세부 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

참고문헌

저 서

한국공업규격(2009), KS기준 D3562, 압력배관용 탄소 강관, pp. 8

한국지역난방공사(2008), 열공급규정

한국지역난방공사(2007), 열배관 공사 시방서

한국지역난방공사(2003), 열배관 건설업무지침서

한국지역난방공사(2003), 열배관시설 유지관리업무지침서

한국지역난방공사(2003), 열배관 기자재 기술편람 (이중보운관 편)

한국지역난방공사(2010), 경영통계

ASTM(1989), "Carbon Steel, Low and Intermediate-Tensile Strength", A 672 and A 285/A 285M Pressure Vessel Plates, pp. 537-541

European District Heating Pipe Manufacturers Association(1997), "District Heating Handbook", pp. 124-131

European Standard Norme Europeenne Europaische Norm(2004), "Design of Steel Structure", Part 1.9 : Fatigue, pp. 14-29

IEA District Heating and Cooling(1996), "Temperature Variations in Preinsulated DH Pipes Low Cycle Fatigue", Report, pp. 18-40

IEA District Heating and Cooling(1999), "Fatigue Analysis of District Heating Systems", Report, pp. 13-33

LUSAS Version 14(2010), Examples Manual, pp. 193-206

TEMPLATE FOR THE PREPARATION OF CEN STANDARDS(2002), "Design and installation of preinsulated bonded pipe systems for district heating"

학술지 및 학술회의 게재논문

M.A Miner(1945), "Cumulative damage in Fatigue", Journal of Applied Mechanics, Vol. 67, pp. A159

M. Matsuishi and T. Endo(1968), "Fatigue of Metals subjected to Varying Stress", paper presented to Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan.

이훈, 김연홍(1999), 지역난방 열배관 유지보수 및 관리대책, 대한설비공학회 1999년도 산업설비부문 강연회, pp. 59-77

장윤석, 정성욱, 김형근, 최재봉, 김영진, 김상호, 김연홍(2005), 운전이력을 고려한 지역난방 열배관의 피로수명 평가 및 관리 체계 구축, 대한기계학회, 대한기계학회 논문집 A권, 제29권 제9호, pp. 1235-1242

김주용, 김호범, 고현일, 안용모, 조종두(2009), 유한요소 시뮬레이션을 통한 지역난방 열배관 특성 평가 및 강화이형관의 제안, 대한기계학회, 대한기계학회 논문집 A권, 제33권 제4호, pp. 337-345

보고서

김정구 등(2002), 열배관 부식피로균열에 관한 연구, 한국지역난방공사

김영진 등(2004), 운전중 발생하는 지역난방수의 온도변화 데이터에 의한 열배관 강관의 수명평가에 관한 연구, 한국지역난방공사

조창연 등(2002), 열배관 전기예열 및 시공기술 개선용역, 한국지역난방공사

주병기 등(2003), 열배관 신축에 따른 응력해소방안 및 특수구간 시공법 개선 연구, 한국지역난방공사

현경수 등(2008), 효율적 열사용 및 수요개발능력 제고를 위한 차온증대방안 연구, 한국지역난방공사

윤석만 등(2005), 회수온도 저감을 위한 사용자설비의 적정규격 및 효과 분석에 관한 연구, 한국지역난방공사

정광섭 등(2006), 지역난방사용자 열사용 실태 분석에 관한 연구, 한국지역난방공사

한국지역난방공사(2011. 3) 업무현황보고

부 록

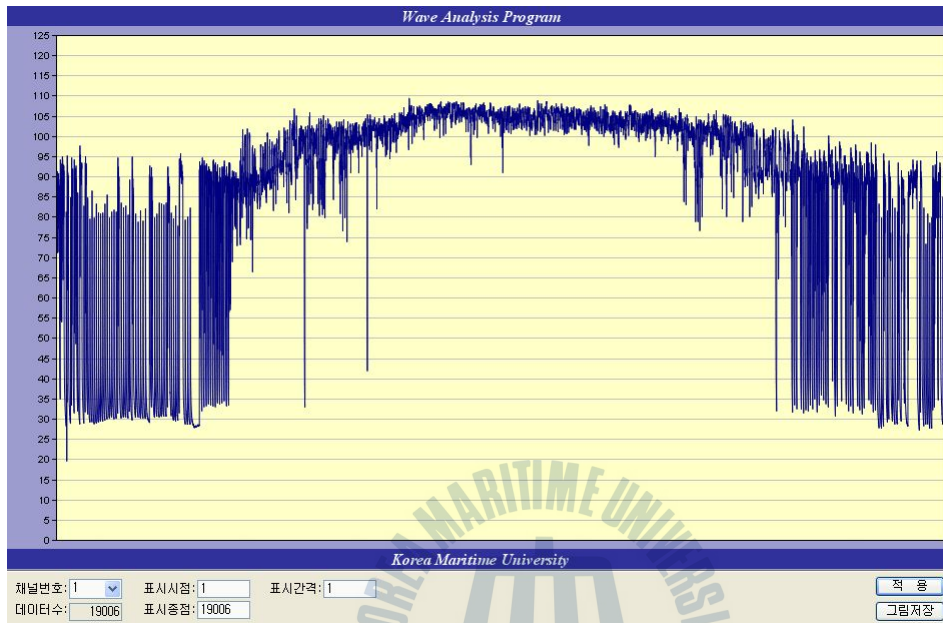
1. 온도그래프
2. 사이클 계수결과
3. 히스토그램 및 빈도그래프
4. 등가전온도사이클수 결과
5. 온도범위에 대한 등가전온도사이클수
6. 이론식을 이용한 응력기반수명 계산
7. 이론식을 이용한 누적손상도 평가
8. 유한요소해석을 이용한 누적손상도 계산
9. Fitting류 누적손상도 평가



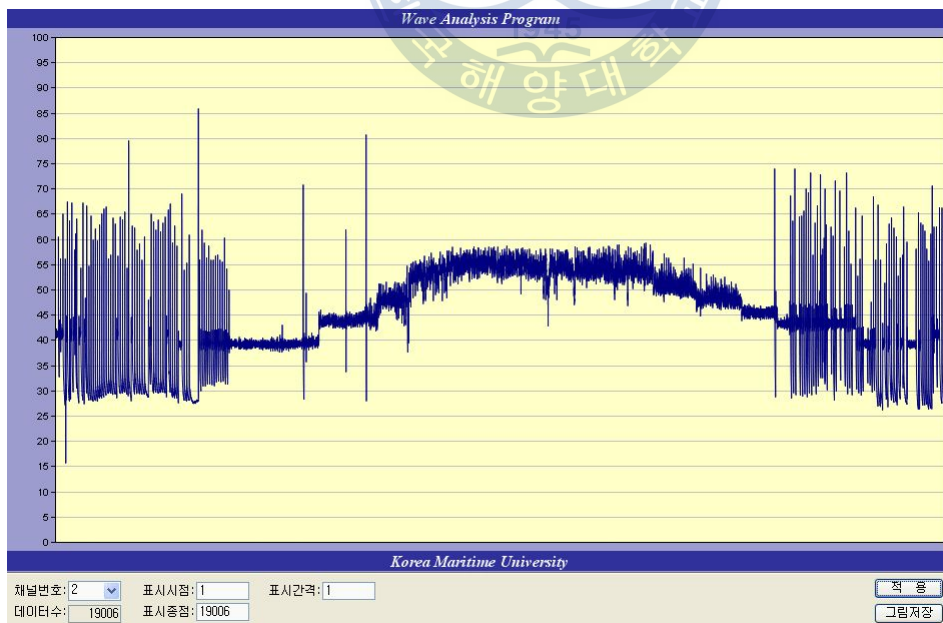
1. 온도그래프

1) E아파트

공급관

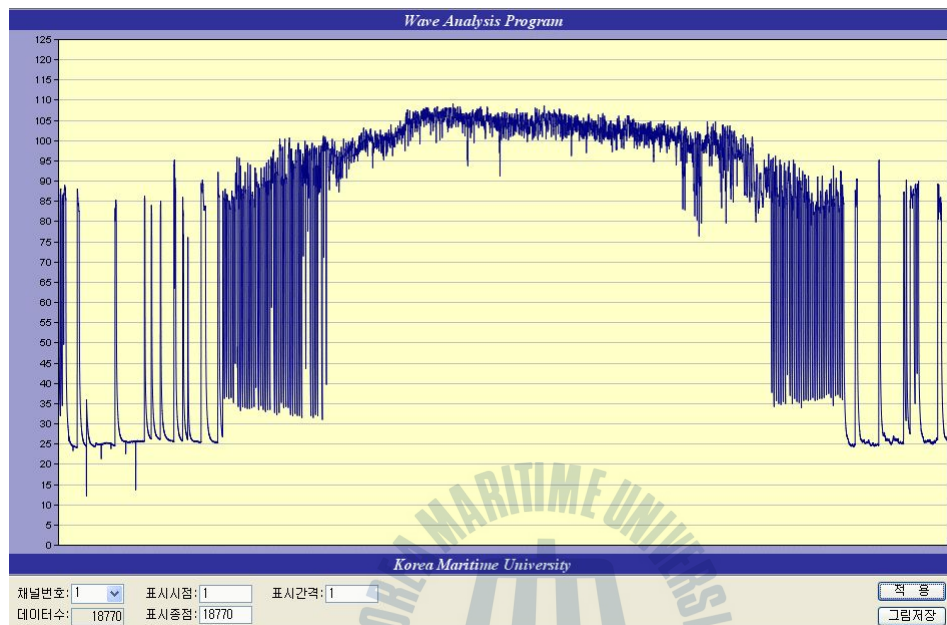


회수관

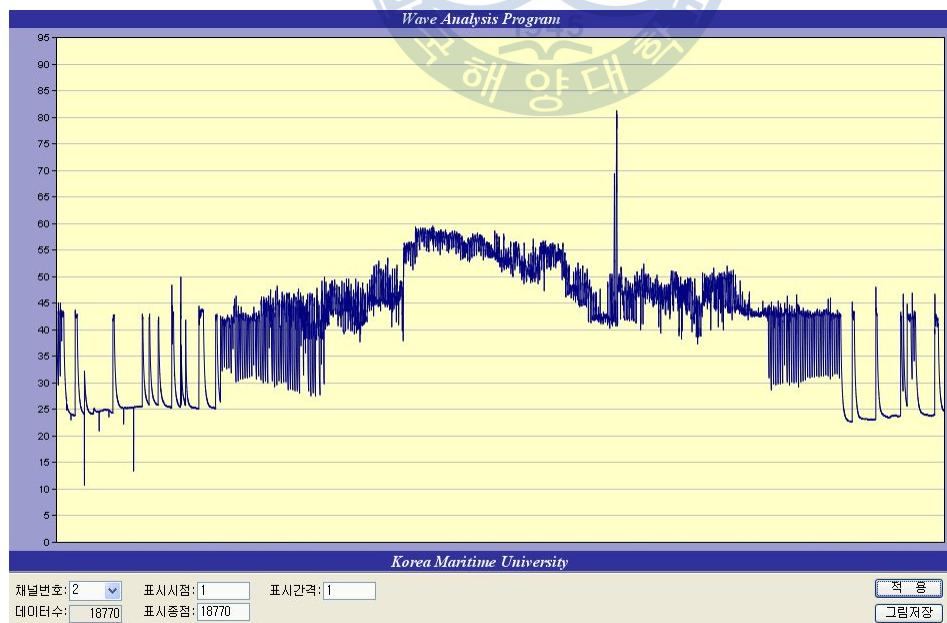


2) F아파트

공급관

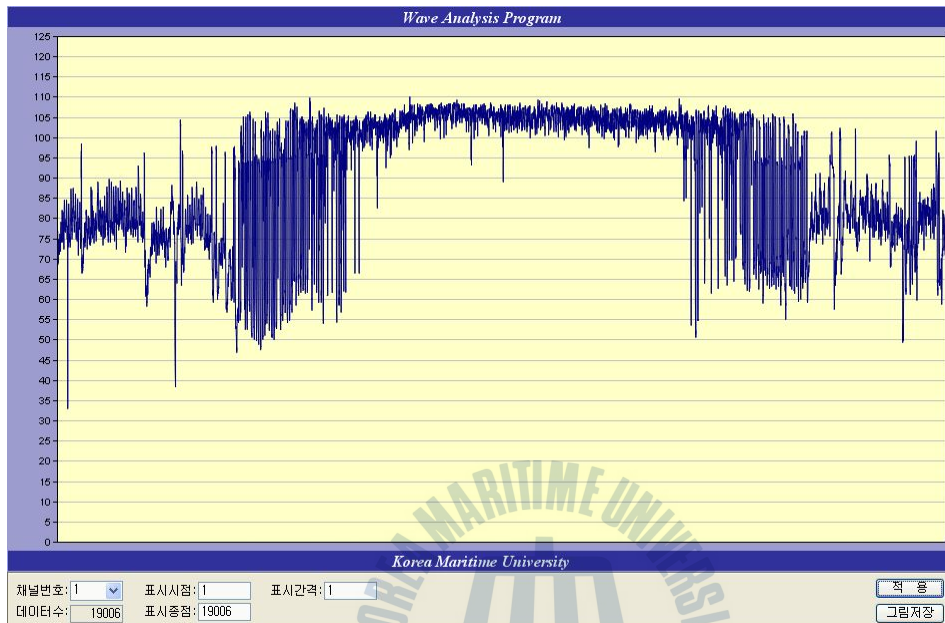


회수관

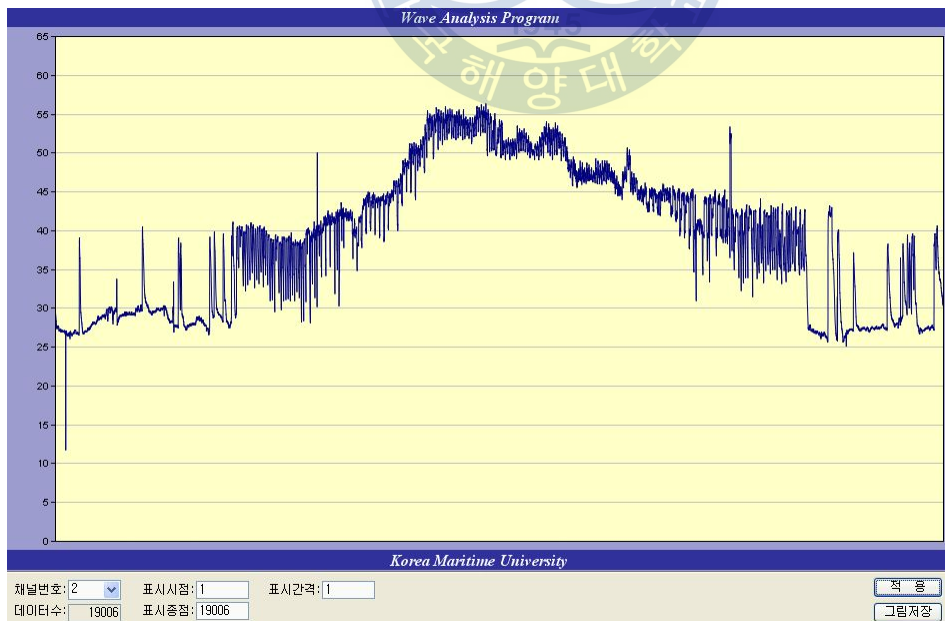


3) G아파트

공급관

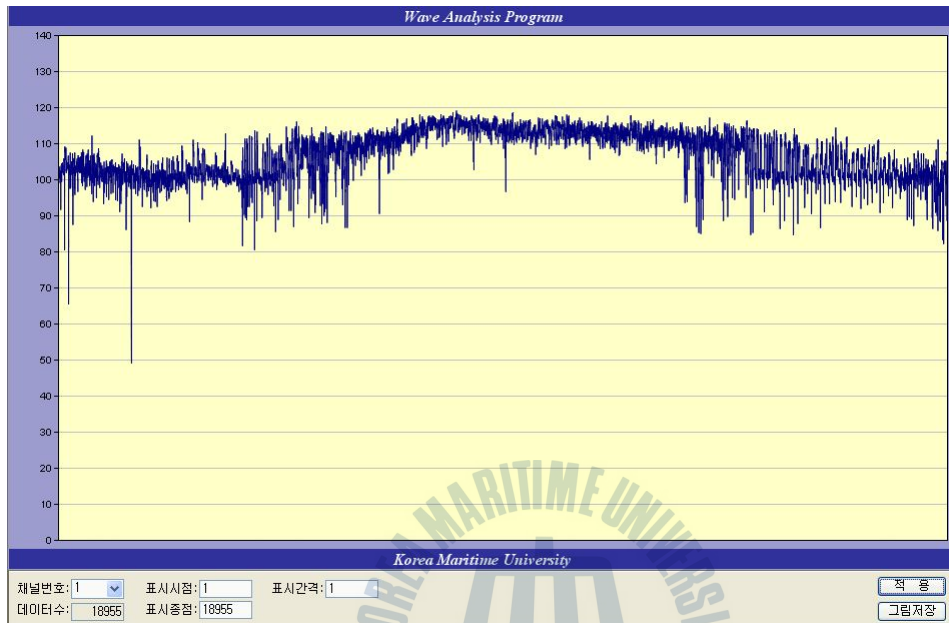


회수관

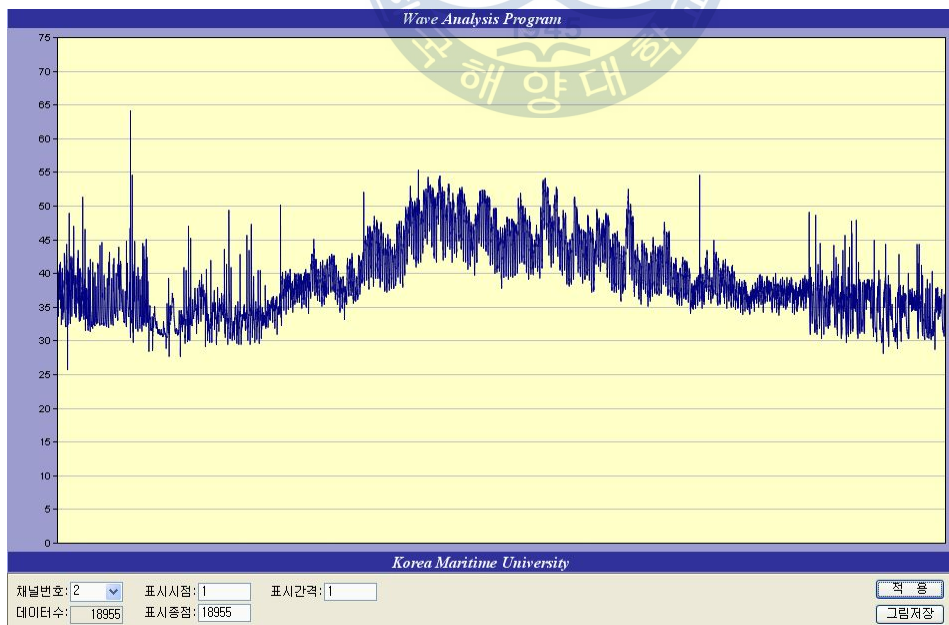


4) H아파트

공급관

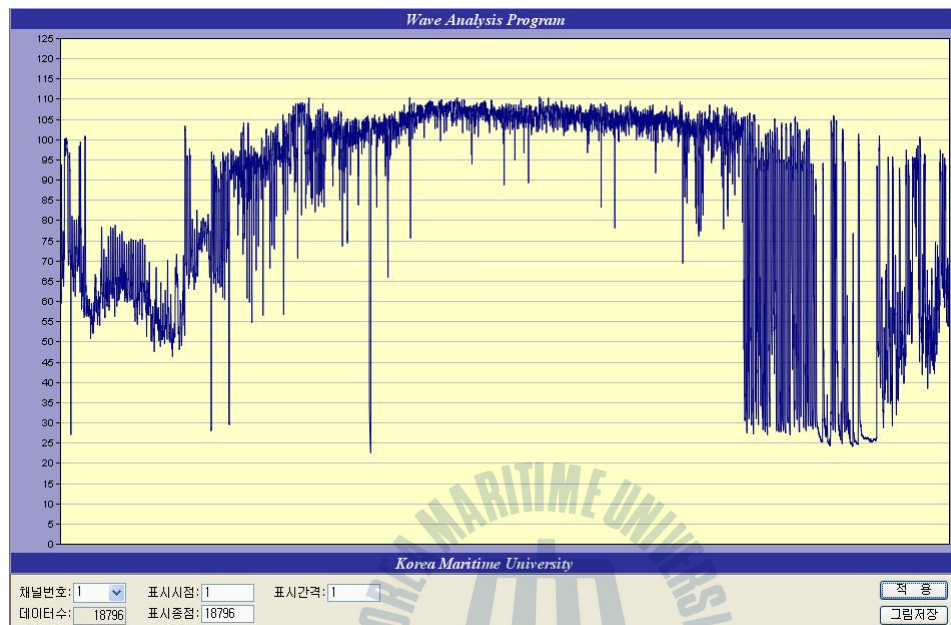


회수관

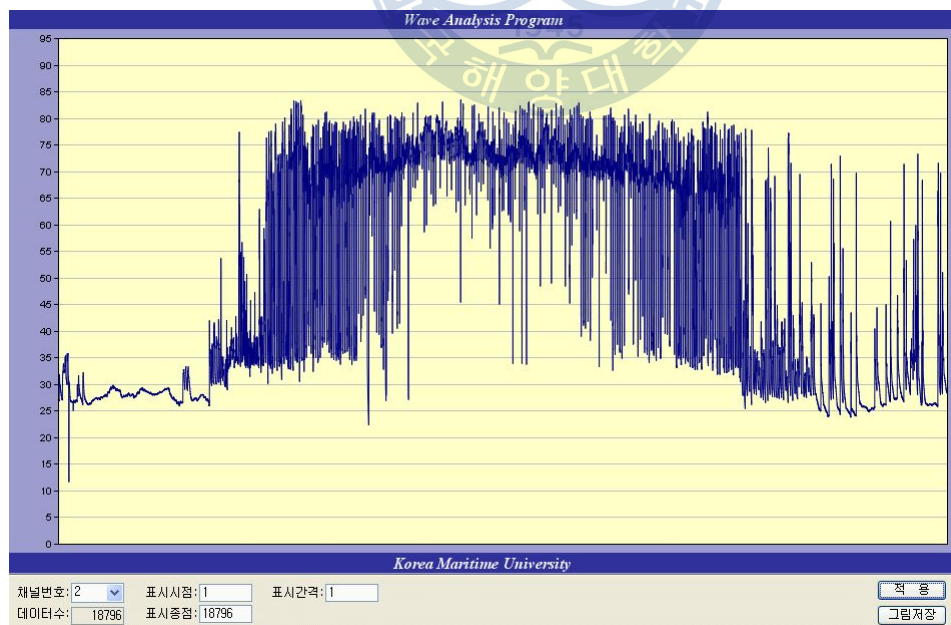


5) I아파트

공급관

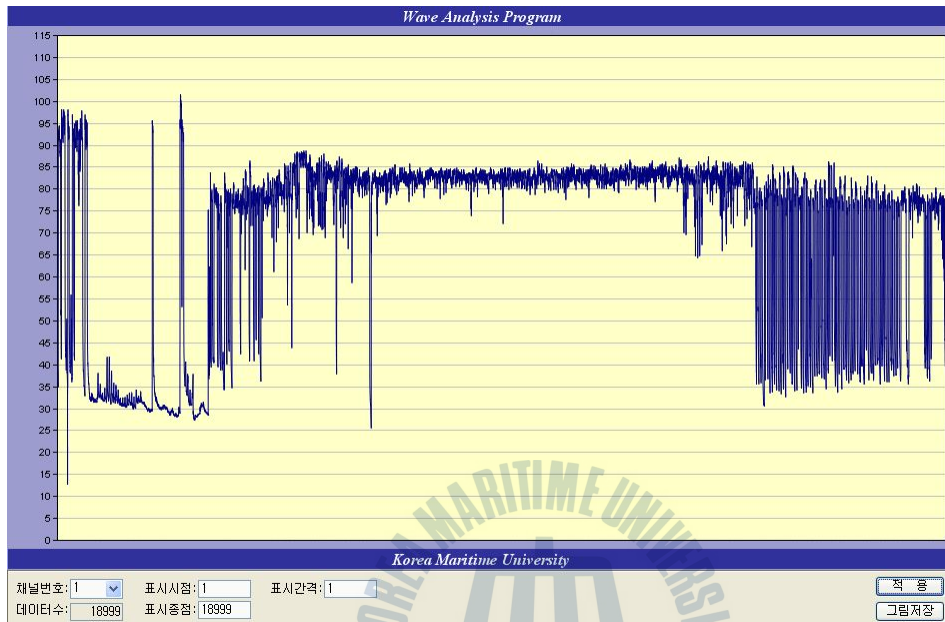


회수관

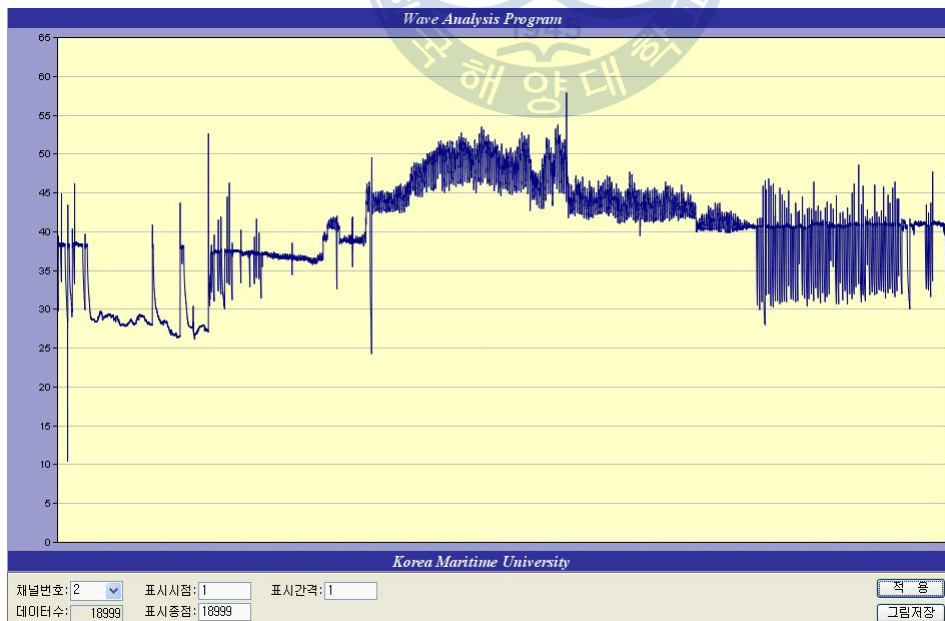


6) J아파트

공급관



회수관



2. 사이클 계수결과



1) E아파트

item	25.0 ~30.0	30.0 ~35.0	35.0 ~40.0	40.0 ~45.0	45.0 ~50.0	50.0 ~55.0	55.0 ~60.0	60.0 ~65.0	65.0 ~70.0	70.0 ~75.0	75.0 ~80.0	80.0 ~85.0	85.0 ~90.0	90.0 ~95.0	95.0 ~100.0	100.0 ~105.0	105.0 ~110.0
0.0~5.0	27	9	5	0	0	0	0	0	0	0	2	6	249	290	276	1088	535
5.0~10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	12	57	29	28	67	4
10.0~15.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	30	23	12	9	1	0
15.0~20.0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	6	13	2	9	3	0	0
20.0~25.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	4	4	12	0	0	0
25.0~30.0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	12	1	2	2	0	0	0
30.0~35.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	2	0	0	0	0	0
35.0~40.0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	2	0	0	0	0	0	0
40.0~45.0	0	0	0	0	0	2	0	0	4	8	0	0	0	0	0	0	0
45.0~50.0	0	0	0	0	0	3	6	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0
50.0~55.0	0	0	0	0	0	11	31	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
55.0~60.0	0	0	0	0	0	0	5	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60.0~65.0	0	0	0	0	0	0	0	17	2	0	0	0	0	0	0	0	0
65.0~70.0	0	0	0	0	0	0	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0

공급관

item	25.0 ~30.0	30.0 ~35.0	35.0 ~40.0	40.0 ~45.0	45.0 ~50.0	50.0 ~55.0	55.0 ~60.0
0.0~5.0	63	19	509	549	514	966	334
5.0~10.0	0	0	0	24	16	64	24
10.0~15.0	0	0	2	0	0	1	0
15.0~20.0	0	0	2	1	1	0	0
20.0~25.0	0	0	1	7	2	0	0
25.0~30.0	0	0	0	28	6	2	0
30.0~35.0	0	0	0	15	19	0	0
35.0~40.0	0	0	0	2	19	2	0
40.0~45.0	0	0	0	0	0	2	0

회수관

2) F아파트

Item	20.0 ~25.0	25.0 ~30.0	30.0 ~35.0	35.0 ~40.0	40.0 ~45.0	45.0 ~50.0	50.0 ~55.0	55.0 ~60.0	60.0 ~65.0	65.0 ~70.0	70.0 ~75.0	75.0 ~80.0	80.0 ~85.0	85.0 ~90.0	90.0 ~95.0	95.0 ~100.0	100.0 ~105.0	105.0 ~110.0
0.0~5.0	52	346	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	72	195	100	316	830	391
5.0~10.0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	6	12	21	49	2
10.0~15.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	4	0	0
15.0~20.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
20.0~25.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0
25.0~30.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
30.0~35.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
35.0~40.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
40.0~45.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
45.0~50.0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
50.0~55.0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	2	0	0	0	0	0	0	0	0
55.0~60.0	0	0	0	0	0	0	0	2	12	1	1	0	0	0	0	0	0	0
60.0~65.0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0
65.0~70.0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0

공급관

Item	20.0 ~25.0	25.0 ~30.0	30.0 ~35.0	35.0 ~40.0	40.0 ~45.0	45.0 ~50.0	50.0 ~55.0	55.0 ~60.0	60.0 ~65.0	65.0 ~70.0	70.0 ~75.0	75.0 ~80.0
0.0~5.0	247	175	1	39	1051	730	379	409	0	0	0	1
5.0~10.0	0	0	1	7	34	54	12	1	0	1	0	0
10.0~15.0	0	0	1	26	3	4	0	0	0	0	0	0
15.0~20.0	0	0	3	22	0	0	0	0	0	0	0	0
20.0~25.0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0
25.0~30.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

회수관

3) G아파트

Item	45.0 ~50.0	50.0 ~55.0	55.0 ~60.0	60.0 ~65.0	65.0 ~70.0	70.0 ~75.0	75.0 ~80.0	80.0 ~85.0	85.0 ~90.0	90.0 ~95.0	95.0 ~100.0	100.0 ~105.0	105.0 ~110.0
0.0~5.0	1	19	29	63	119	146	311	173	38	109	101	1038	780
5.0~10.0	0	0	0	1	7	7	40	36	8	6	10	86	6
10.0~15.0	0	0	0	0	1	1	9	25	5	3	4	2	0
15.0~20.0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	1	2	0	0
20.0~25.0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	0	0
25.0~30.0	0	0	0	0	0	0	0	6	1	5	0	0	0
30.0~35.0	0	0	0	0	0	0	7	3	1	0	0	0	0
35.0~40.0	0	0	0	0	0	1	7	5	7	0	0	0	0
40.0~45.0	0	0	0	0	0	0	3	18	5	0	0	0	0
45.0~50.0	0	0	0	0	0	2	3	7	1	0	0	0	0
50.0~55.0	0	0	0	0	0	0	7	2	0	0	0	0	0
55.0~60.0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

공급관

Item	25.0 ~30.0	30.0 ~35.0	35.0 ~40.0	40.0 ~45.0	45.0 ~50.0	50.0 ~55.0	55.0 ~60.0
0.0~5.0	918	76	312	700	485	562	31
5.0~10.0	1	8	44	12	2	2	0
10.0~15.0	0	7	2	0	0	0	0

회수관

4) H아파트

item	90,0 ~95,0	95,0 ~100,0	100,0 ~105,0	105,0 ~110,0	110,0 ~115,0	115,0 ~120,0
0,0~5,0	4	252	1190	512	1375	323
5,0~10,0	1	24	58	41	82	0
10,0~15,0	1	14	27	13	2	0
15,0~20,0	1	6	15	6	0	0
20,0~25,0	0	0	9	1	0	0
25,0~30,0	0	3	6	0	0	0

공급관

item	30,0 ~35,0	35,0 ~40,0	40,0 ~45,0	45,0 ~50,0	50,0 ~55,0
0,0~5,0	393	1340	564	438	169
5,0~10,0	21	90	68	35	1
10,0~15,0	0	31	4	5	0
15,0~20,0	0	4	1	0	0
20,0~25,0	0	0	1	0	0

회수관

5) I아파트

item	20.0 ~25.0	25.0 ~30.0	30.0 ~35.0	35.0 ~40.0	40.0 ~45.0	45.0 ~50.0	50.0 ~55.0	55.0 ~60.0	60.0 ~65.0	65.0 ~70.0	70.0 ~75.0	75.0 ~80.0	80.0 ~85.0	85.0 ~90.0	90.0 ~95.0	95.0 ~100.0	100.0 ~105.0	105.0 ~110.0
0.0~5.0	8	110	23	9	12	48	67	97	90	61	28	21	3	13	203	196	882	1029
5.0~10.0	0	0	1	4	2	6	7	9	12	4	1	2	1	3	18	11	59	35
10.0~15.0	0	0	1	2	3	0	3	3	3	7	6	1	0	7	5	7	7	0
15.0~20.0	0	0	0	0	1	0	4	4	6	7	2	0	1	3	1	8	0	0
20.0~25.0	0	0	0	0	0	2	1	2	3	1	0	0	3	3	5	7	0	0
25.0~30.0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	2	3	2	5	3	0	0
30.0~35.0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	3	2	1	0	0	0
35.0~40.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0
40.0~45.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0
45.0~50.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
50.0~55.0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
55.0~60.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
60.0~65.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65.0~70.0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
70.0~75.0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0
75.0~80.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0

공급관

item	20.0 ~25.0	25.0 ~30.0	30.0 ~35.0	35.0 ~40.0	40.0 ~45.0	45.0 ~50.0	50.0 ~55.0	55.0 ~60.0	60.0 ~65.0	65.0 ~70.0	70.0 ~75.0	75.0 ~80.0	80.0 ~85.0
0.0~5.0	31	729	222	272	56	26	15	11	40	337	896	308	25
5.0~10.0	0	2	14	26	11	5	5	2	10	21	68	12	0
10.0~15.0	0	0	5	9	5	4	4	2	4	14	38	8	0
15.0~20.0	0	0	2	7	3	2	2	1	2	3	11	0	0
20.0~25.0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	1	4	0	0
25.0~30.0	0	0	0	0	2	1	0	0	2	4	0	0	0
30.0~35.0	0	0	0	0	2	2	1	0	5	2	0	0	0
35.0~40.0	0	0	0	0	0	1	5	9	10	0	0	0	0
40.0~45.0	0	0	0	0	0	5	4	39	1	0	0	0	0
45.0~50.0	0	0	0	0	0	1	2	17	0	0	0	0	0

회수관

6) J아파트

item	25,0 ~30,0	30,0 ~35,0	35,0 ~40,0	40,0 ~45,0	45,0 ~50,0	50,0 ~55,0	55,0 ~60,0	60,0 ~65,0	65,0 ~70,0	70,0 ~75,0	75,0 ~80,0	80,0 ~85,0	85,0 ~90,0	90,0 ~95,0	95,0 ~100,0	100,0 ~105,0
0,0~5,0	116	252	60	54	6	3	1	2	1	26	785	2235	128	56	13	1
5,0~10,0	0	2	2	0	0	0	1	0	2	10	26	32	1	5	0	0
10,0~15,0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	6	15	3	0	1	0	0
15,0~20,0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	15	0	1	0	0	0
20,0~25,0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0
25,0~30,0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
30,0~35,0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
35,0~40,0	0	0	0	0	0	0	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0
40,0~45,0	0	0	0	0	0	0	20	3	0	1	0	0	0	0	0	0
45,0~50,0	0	0	0	0	0	0	16	1	0	0	0	0	0	0	0	0
50,0~55,0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
55,0~60,0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
60,0~65,0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

공급관

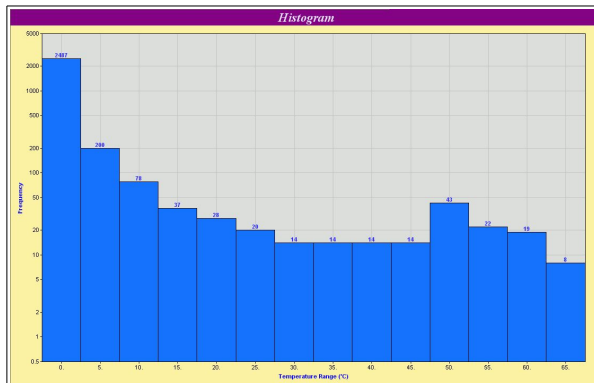
item	25,0 ~30,0	30,0 ~35,0	35,0 ~40,0	40,0 ~45,0	45,0 ~50,0	50,0 ~55,0
0,0~5,0	403	12	957	2091	633	216
5,0~10,0	0	3	22	3	35	0
10,0~15,0	0	0	42	0	1	0
15,0~20,0	0	0	1	0	0	0

회수관

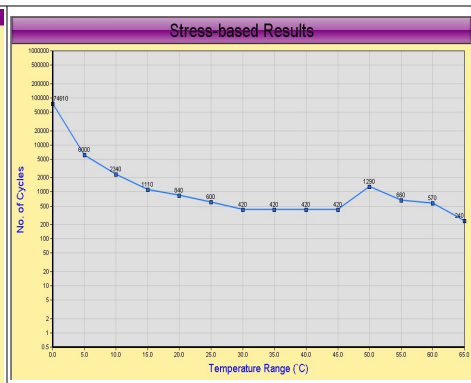
3. 히스토그램 및 빈도그래프



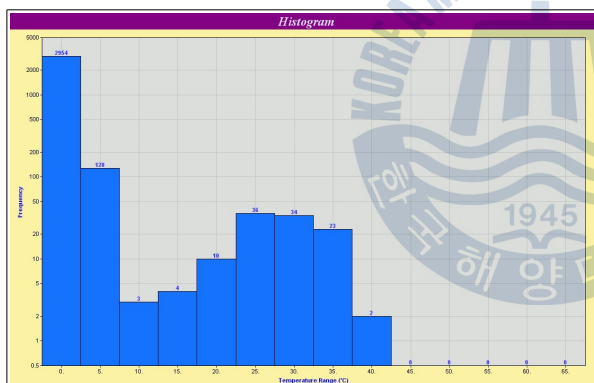
1) E아파트



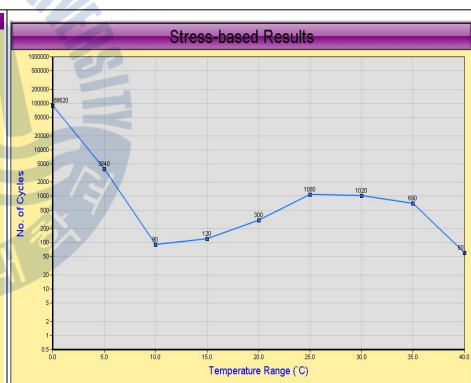
공급관 히스토그램



공급관 빈도그래프

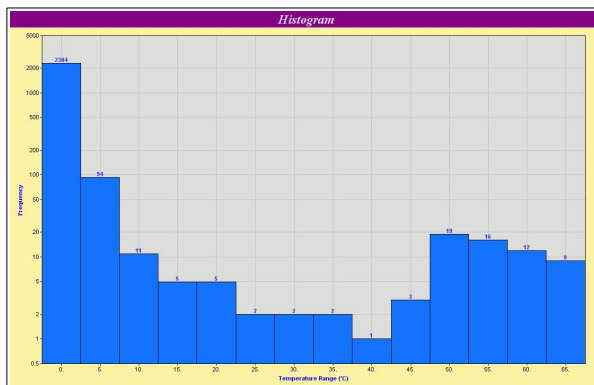


회수관 히스토그램

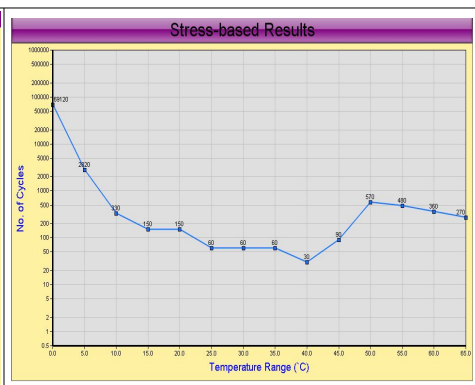


회수관 빈도그래프

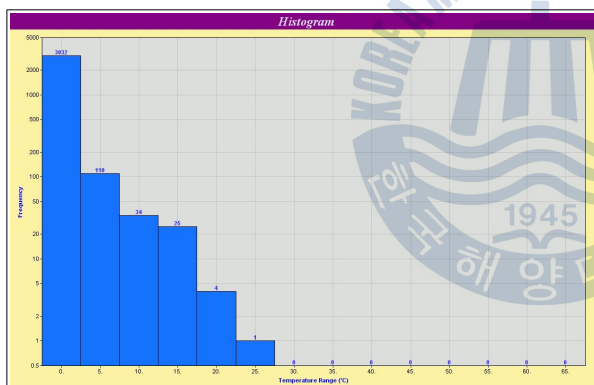
2) F아파트



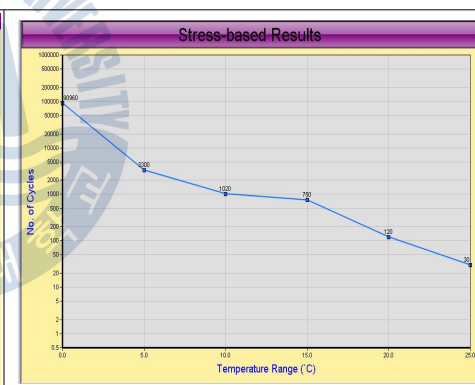
공급관 히스토그램



공급관 빈도그래프

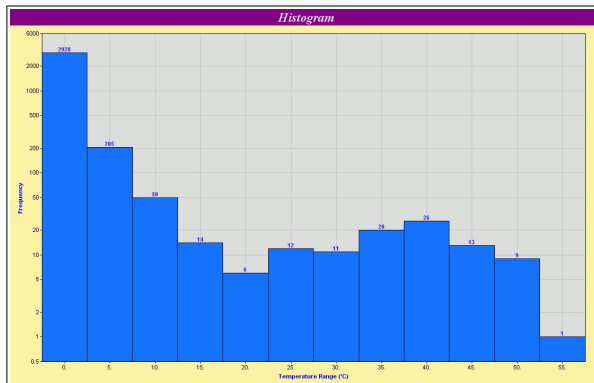


회수관 히스토그램

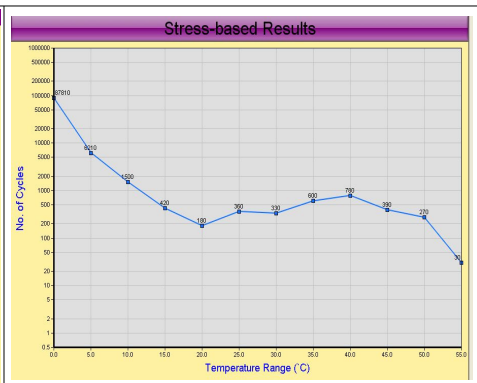


회수관 빈도그래프

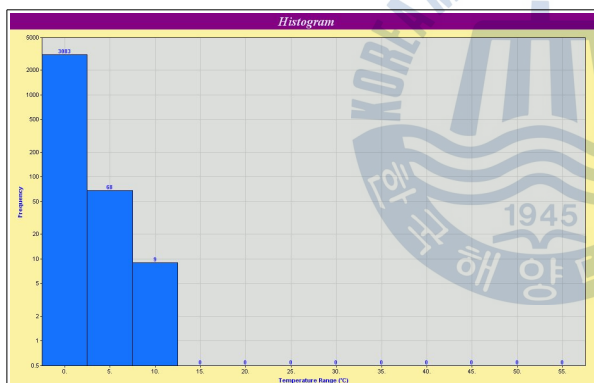
3) G아파트



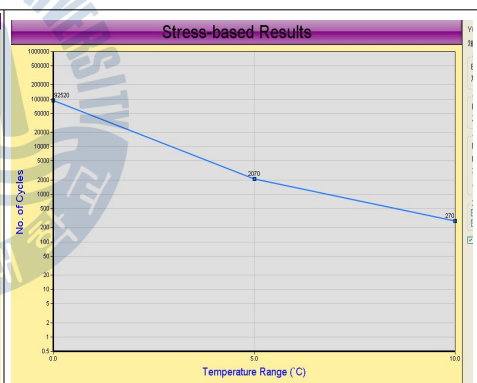
공급관 히스토그램



공급관 빈도그래프

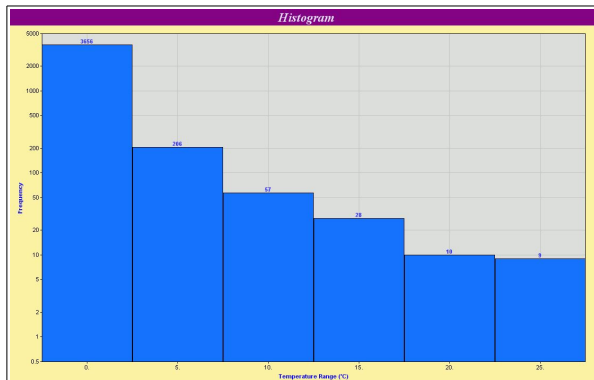


회수관 히스토그램

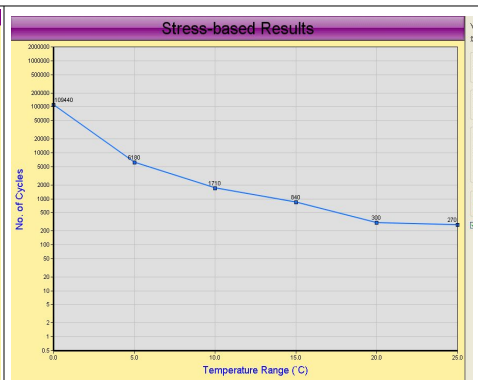


회수관 빈도그래프

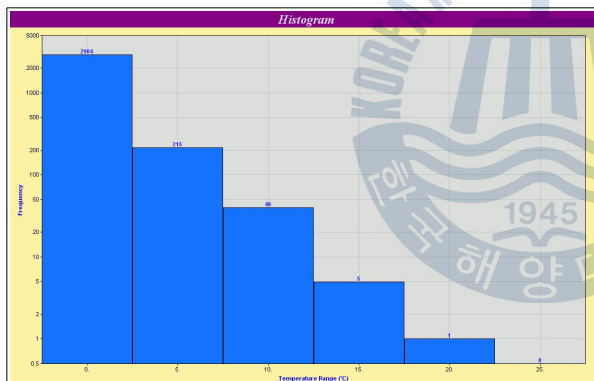
4) H아파트



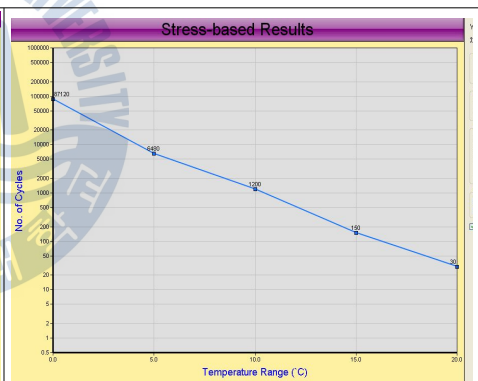
공급관 히스토그램



공급관 빈도그래프

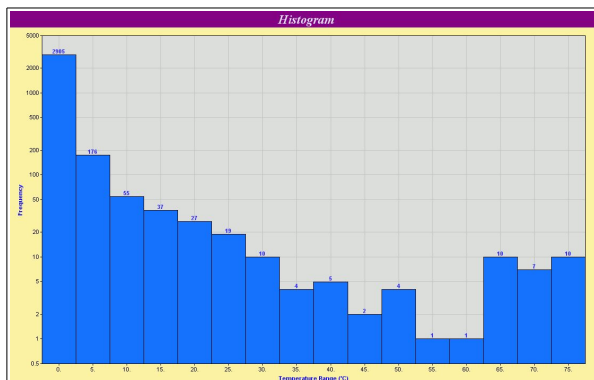


회수관 히스토그램

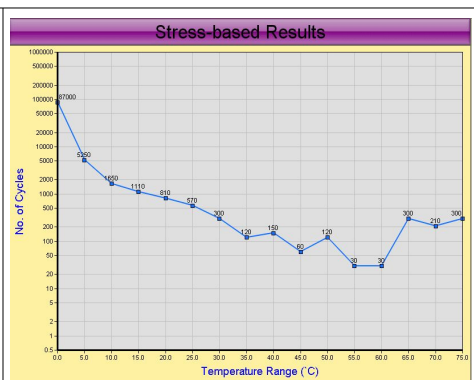


회수관 빈도그래프

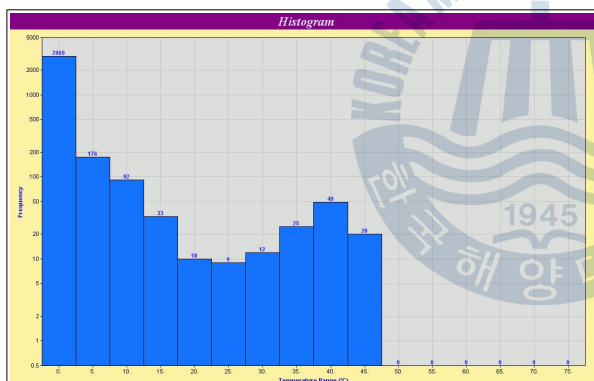
5) I아파트



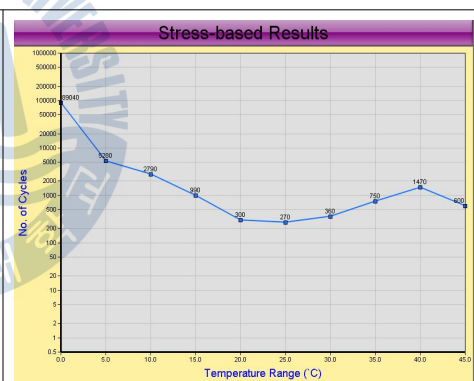
공급관 히스토그램



공급관 빈도그래프

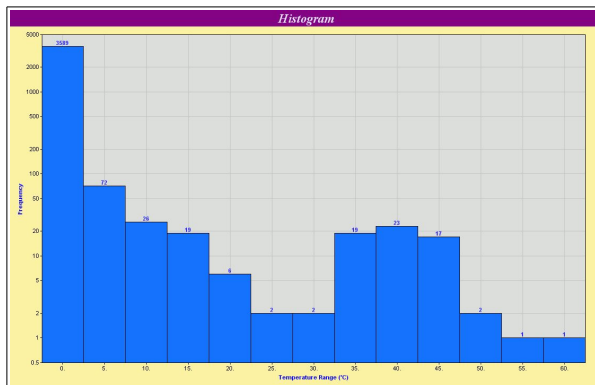


회수관 히스토그램

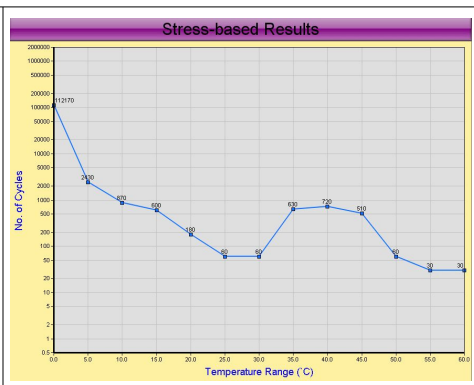


회수관 빈도그래프

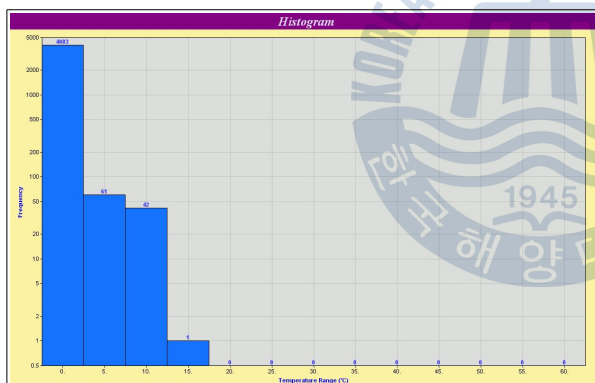
6) J아파트



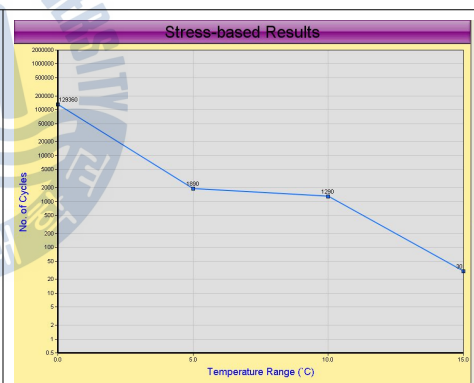
공급관 히스토그램



공급관 빈도그래프



회수관 히스토그램



회수관 빈도그래프

4. 등가전온도사이클수 결과



1) E아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	2487	0,02920	0,00066	0,00002
10,0	200	0,06339	0,00432	0,00029
15,0	78	0,11446	0,01301	0,00148
20,0	37	0,14898	0,02370	0,00377
25,0	28	0,23962	0,04901	0,01003
30,0	20	0,31250	0,07813	0,01953
35,0	14	0,36108	0,10668	0,03152
40,0	14	0,55468	0,18910	0,06446
45,0	14	0,80745	0,31197	0,12053
50,0	14	1,12728	0,48678	0,21020
55,0	43	4,67486	2,23118	1,06488
60,0	22	3,14230	1,64257	0,85862
65,0	19	3,48510	1,98017	1,12510
70,0	8	1,84852	1,13432	0,69606
Total	2998	16,90942	8,25160	4,20649

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	2954	0,03468	0,00079	0,00002
10,0	128	0,04057	0,00277	0,00019
15,0	3	0,00440	0,00050	0,00006
20,0	4	0,01611	0,00256	0,00041
25,0	10	0,08558	0,01750	0,00358
30,0	36	0,56250	0,14063	0,03516
35,0	34	0,87690	0,25908	0,07655
40,0	23	0,91126	0,31066	0,10591
45,0	2	0,11535	0,04457	0,01722
Total	3194	2,64735	0,77906	0,23908

회수관

2) F아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	2304	0,02705	0,00061	0,00001
10,0	94	0,02979	0,00203	0,00014
15,0	11	0,01614	0,00183	0,00021
20,0	5	0,02013	0,00320	0,00051
25,0	5	0,04279	0,00875	0,00179
30,0	2	0,03125	0,00781	0,00195
35,0	2	0,05158	0,01524	0,00450
40,0	2	0,07924	0,02701	0,00921
45,0	1	0,05768	0,02228	0,00861
50,0	3	0,24156	0,10431	0,04504
55,0	19	2,06563	0,98587	0,47053
60,0	16	2,28531	1,19459	0,62445
65,0	12	2,20112	1,25063	0,71059
70,0	9	2,07958	1,27611	0,78307
Total	2485	9,22886	4,90030	2,66061

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	3032	0,03559	0,00081	0,00002
10,0	110	0,03487	0,00238	0,00016
15,0	34	0,04989	0,00567	0,00064
20,0	25	0,10066	0,01601	0,00255
25,0	4	0,03423	0,00700	0,00143
30,0	1	0,01563	0,00391	0,00098
Total	3206	0,27087	0,03578	0,00578

회수관

3) G아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3.00	b = 4.00	b = 5.00
5.0	2927	0.03436	0.00078	0.00002
10.0	207	0.06561	0.00447	0.00031
15.0	50	0.07337	0.00834	0.00095
20.0	14	0.05637	0.00897	0.00143
25.0	6	0.05135	0.01050	0.00215
30.0	12	0.18750	0.04688	0.01172
35.0	11	0.28370	0.08382	0.02477
40.0	20	0.79240	0.27014	0.09209
45.0	26	1.49955	0.57937	0.22385
50.0	13	1.04676	0.45201	0.19519
55.0	9	0.97846	0.46699	0.22288
60.0	1	0.14283	0.07466	0.03903
Total	3296	5.21227	2.00693	0.81437

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3.00	b = 4.00	b = 5.00
5.0	3084	0.03620	0.00082	0.00002
10.0	69	0.02187	0.00149	0.00010
15.0	9	0.01321	0.00150	0.00017
Total	3162	0.07128	0.00381	0.00029

회수관

4) H아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	3648	0,04282	0,00097	0,00002
10,0	206	0,06529	0,00445	0,00030
15,0	57	0,08364	0,00950	0,00108
20,0	28	0,11274	0,01794	0,00285
25,0	10	0,08558	0,01750	0,00358
30,0	9	0,14063	0,03516	0,00879
Total	3958	0,53071	0,08553	0,01663

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	2904	0,03409	0,00077	0,00002
10,0	216	0,06846	0,00467	0,00032
15,0	40	0,05870	0,00667	0,00076
20,0	5	0,02013	0,00320	0,00051
25,0	1	0,00856	0,00175	0,00036
Total	3166	0,18994	0,01707	0,00196

회수관

5) I아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3.00	b = 4.00	b = 5.00
5.0	2900	0.03404	0.00077	0.00002
10.0	175	0.05547	0.00378	0.00026
15.0	55	0.08071	0.00917	0.00104
20.0	37	0.14898	0.02370	0.00377
25.0	27	0.23106	0.04726	0.00967
30.0	19	0.29688	0.07422	0.01855
35.0	10	0.25791	0.07620	0.02251
40.0	4	0.15848	0.05403	0.01842
45.0	5	0.28838	0.11142	0.04305
50.0	2	0.16104	0.06954	0.03003
55.0	4	0.43487	0.20755	0.09906
60.0	1	0.14283	0.07466	0.03903
65.0	1	0.18343	0.10422	0.05922
70.0	10	2.31065	1.41790	0.87007
75.0	7	2.00417	1.32093	0.87061
80.0	10	3.49725	2.46397	1.73598
Total	3267	10.28615	6.05933	3.82129

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3.00	b = 4.00	b = 5.00
5.0	2968	0.03484	0.00079	0.00002
10.0	176	0.05579	0.00380	0.00026
15.0	93	0.13647	0.01551	0.00176
20.0	33	0.13288	0.02114	0.00336
25.0	10	0.08558	0.01750	0.00358
30.0	9	0.14063	0.03516	0.00879
35.0	12	0.30949	0.09144	0.02702
40.0	25	0.99050	0.33767	0.11512
45.0	49	2.82608	1.09190	0.42187
50.0	20	1.61040	0.69540	0.30029
Total	3395	6.32265	2.31031	0.88206

회수관

6) J아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	3739	0,04389	0,00100	0,00002
10,0	81	0,02567	0,00175	0,00012
15,0	29	0,04255	0,00484	0,00055
20,0	20	0,08053	0,01281	0,00204
25,0	6	0,05135	0,01050	0,00215
30,0	2	0,03125	0,00781	0,00195
35,0	2	0,05158	0,01524	0,00450
40,0	21	0,83202	0,28364	0,09670
45,0	24	1,38420	0,53481	0,20663
50,0	17	1,36884	0,59109	0,25524
55,0	2	0,21744	0,10378	0,04953
60,0	1	0,14283	0,07466	0,03903
65,0	1	0,18343	0,10422	0,05922
Total	3945	4,45559	1,74615	0,71768

공급관

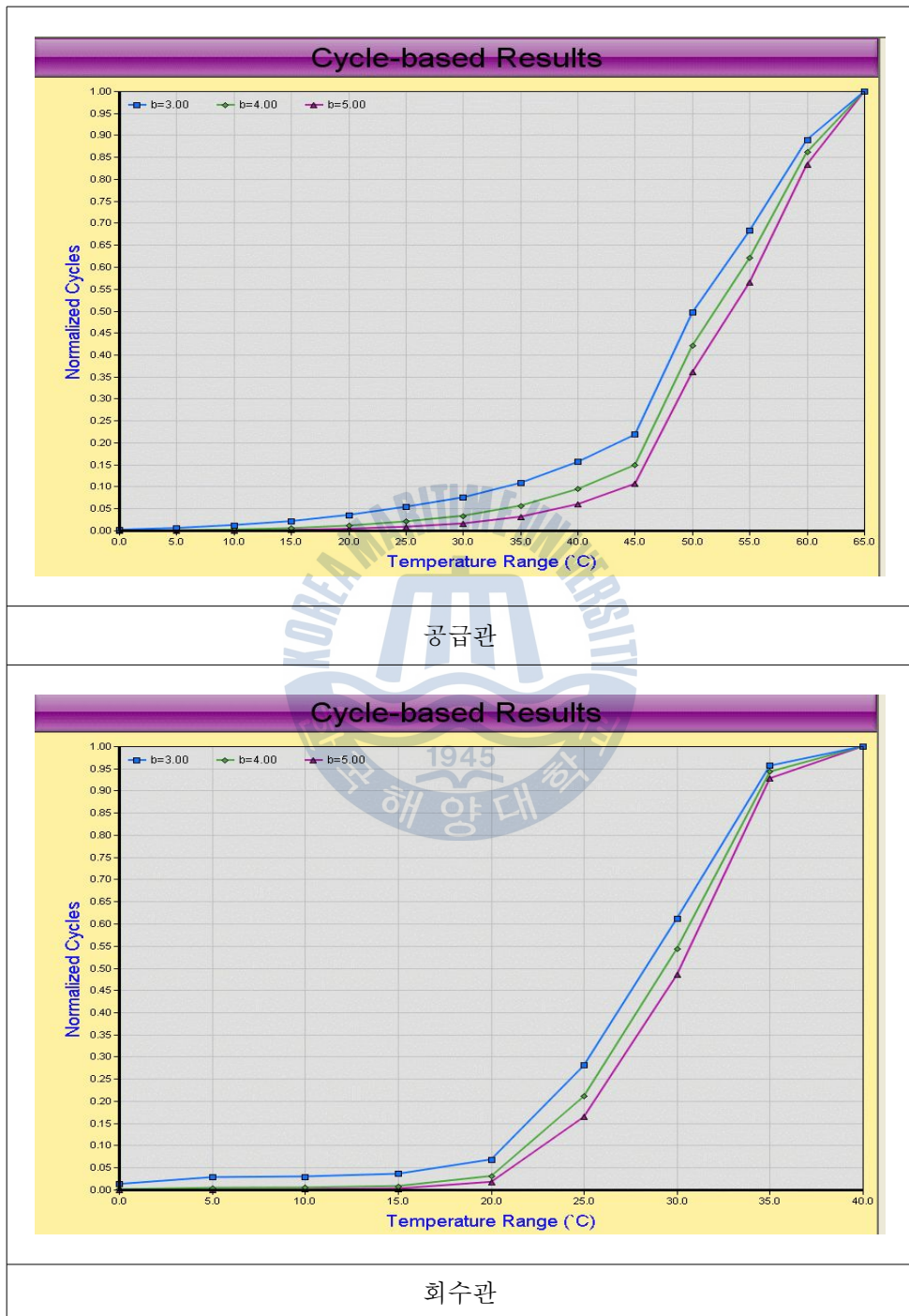
ΔT (°C)	No. of Cycles	b = 3,00	b = 4,00	b = 5,00
5,0	4312	0,05062	0,00115	0,00003
10,0	63	0,01997	0,00136	0,00009
15,0	43	0,06310	0,00717	0,00081
20,0	1	0,00403	0,00064	0,00010
Total	4419	0,13771	0,01032	0,00104

회수관

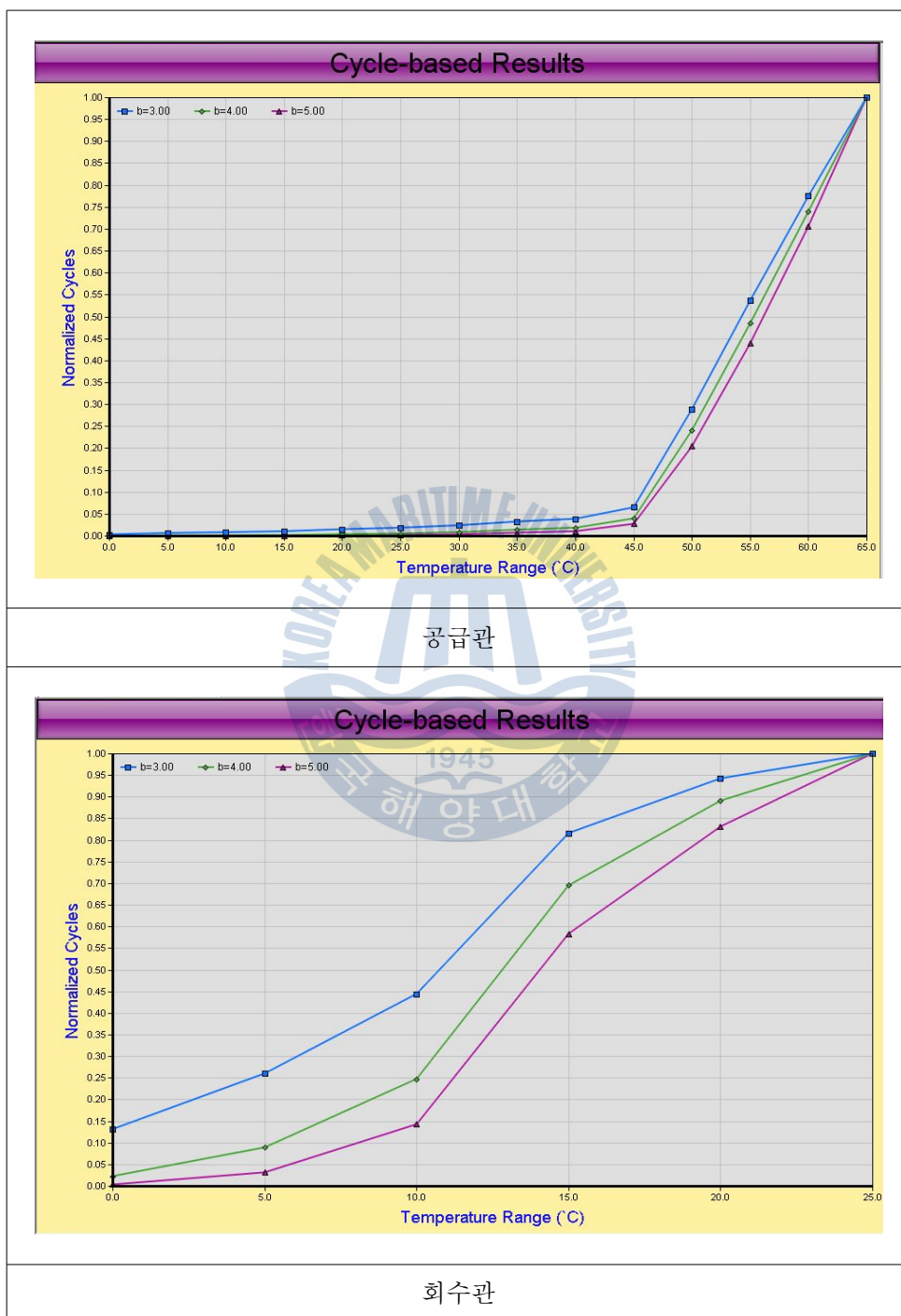
5. 온도범위에 대한 등가전온도사이클수



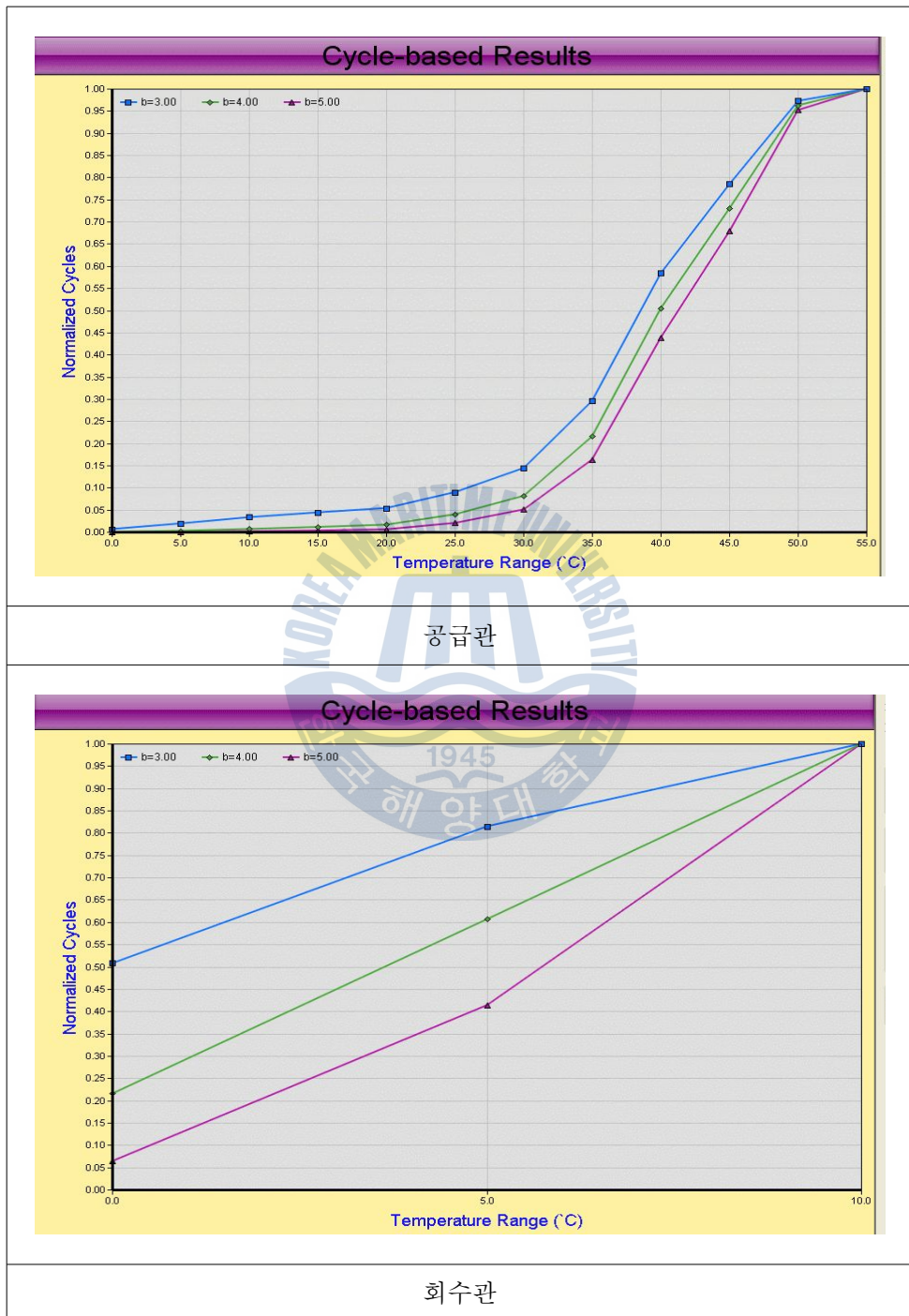
1) E아파트



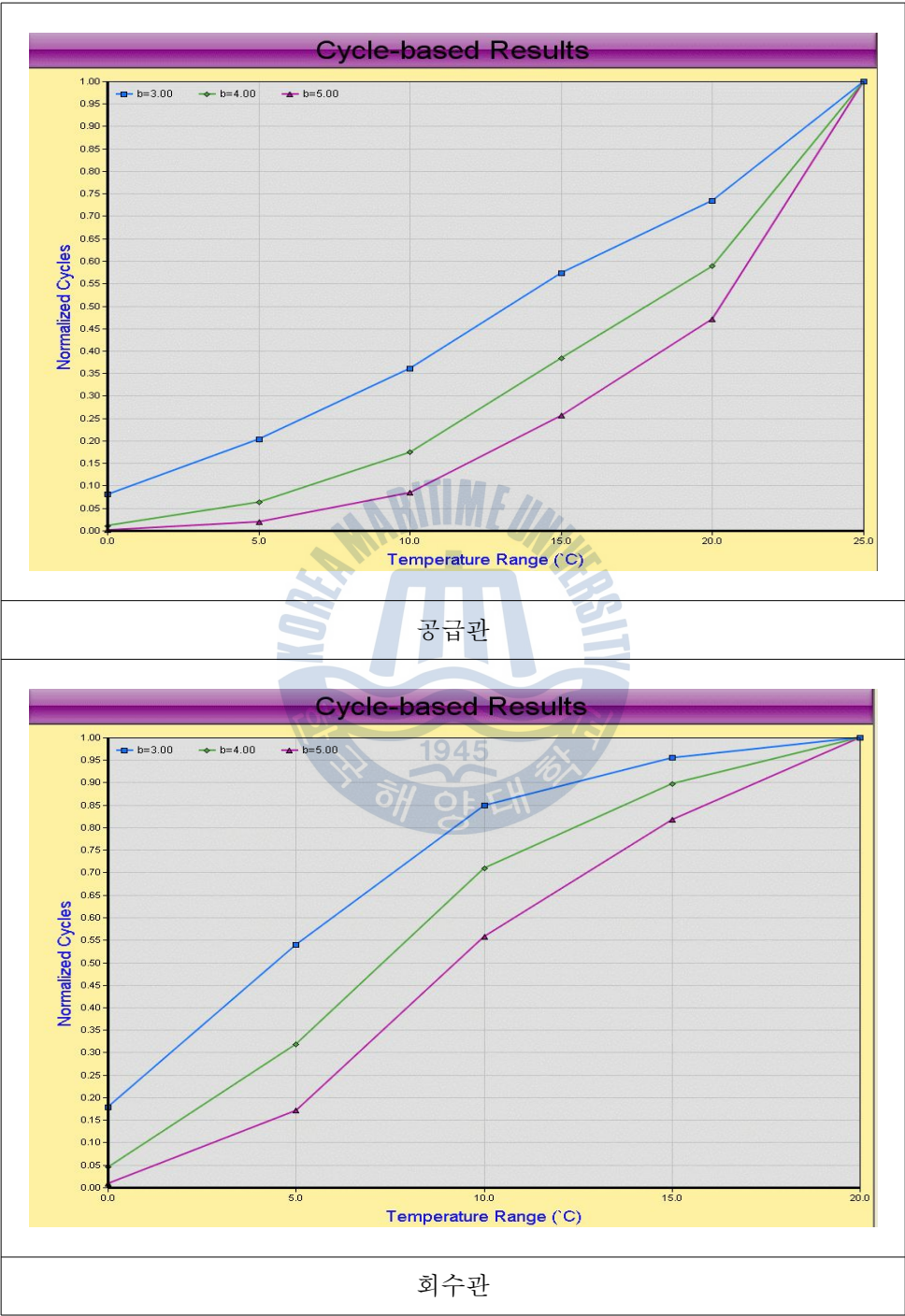
2) F아파트



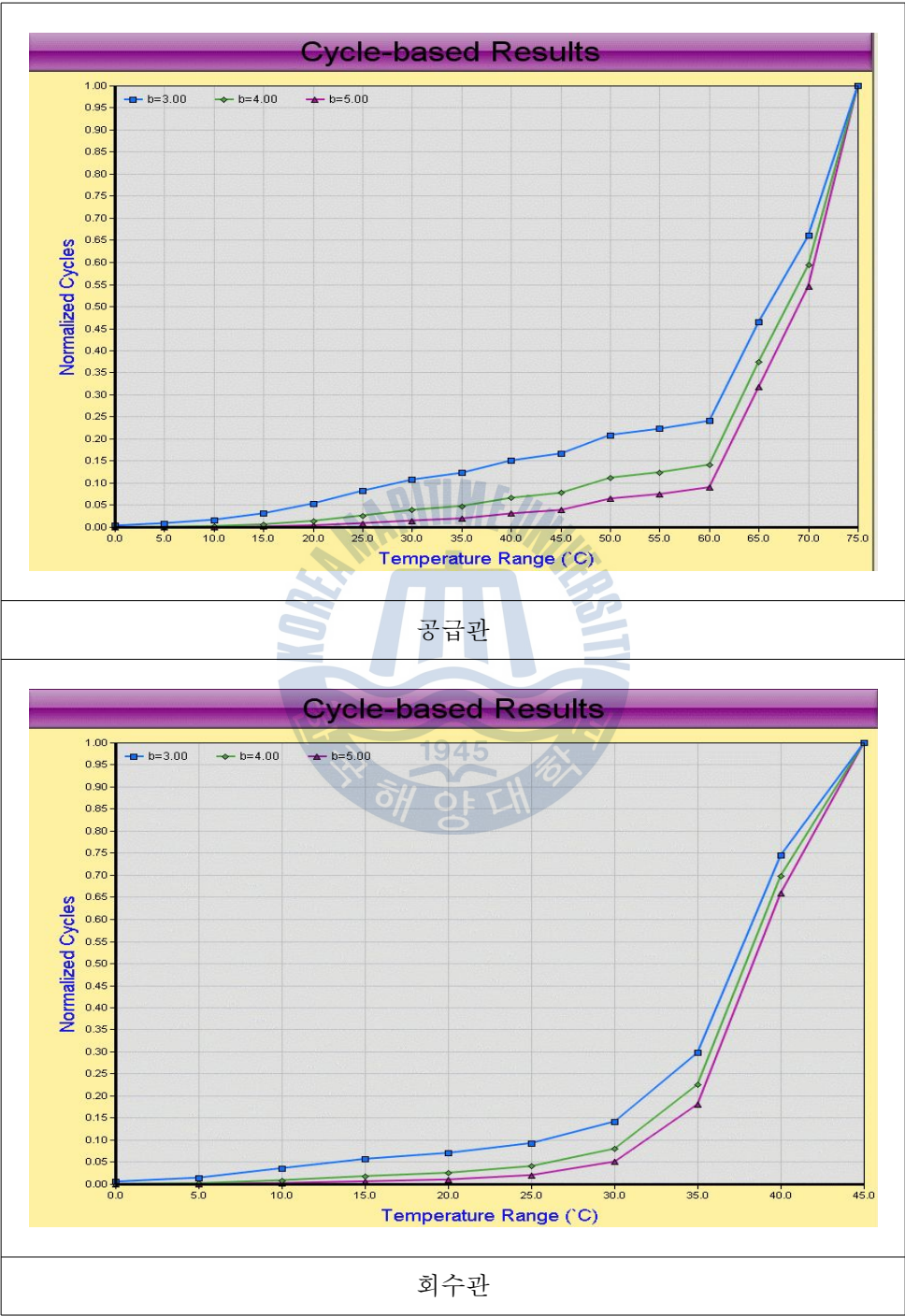
3) G아파트



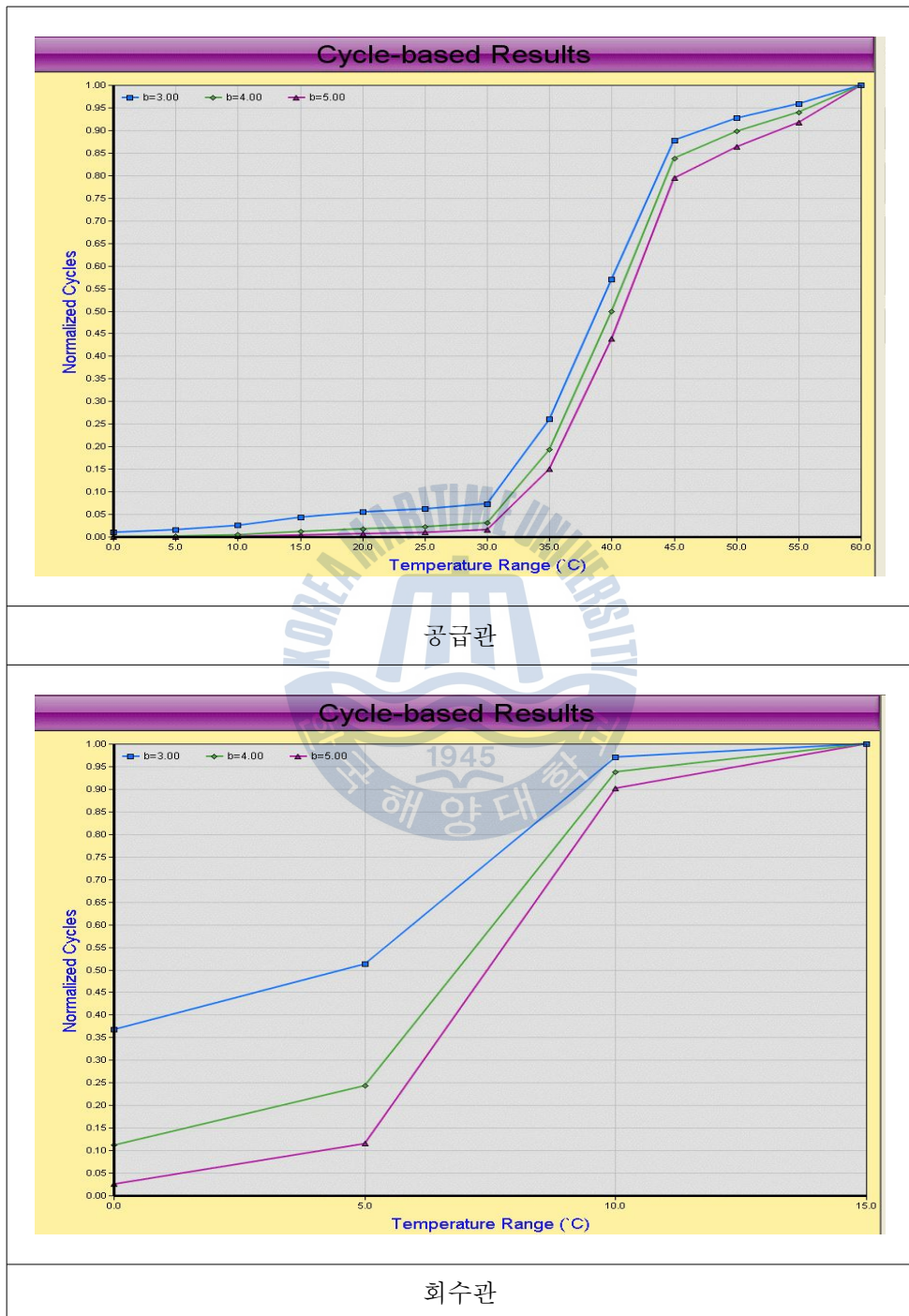
4) H아파트



5) I아파트



6) J아파트



6. 이론식을 이용한 응력기반피로수명 계산



1) E아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	74610	5,821	2,910	---	---
10,0	6000	17,477	8,738	---	---
15,0	2340	29,152	14,576	93042107	0,0000251500
20,0	1110	40,846	20,423	17229373	0,0000644249
25,0	840	52,559	26,279	4930239	0,0001703772
30,0	600	64,290	32,145	2693908	0,0002227248
35,0	420	76,038	38,019	1628207	0,0002579526
40,0	420	87,803	43,901	1057508	0,0003971600
45,0	420	99,504	49,752	726579	0,0005780514
50,0	420	111,204	55,602	520532	0,0008068674
55,0	1290	122,901	61,451	385598	0,0033454549
60,0	660	134,597	67,298	293562	0,0022482486
65,0	570	146,290	73,145	228644	0,0024929575
70,0	240	158,070	79,035	181240	0,0013242107
Total	89940				0,0119335795

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	88620	5,821	2,910	---	---
10,0	3840	17,477	8,738	---	---
15,0	90	29,152	14,576	93042107	0,0000009674
20,0	120	40,846	20,423	17229373	0,0000069649
25,0	300	52,559	26,279	4930239	0,0000608490
30,0	1080	64,290	32,145	2693908	0,0004009047
35,0	1020	76,038	38,019	1628207	0,0006264561
40,0	690	87,803	43,901	1057508	0,0006524771
45,0	60	99,504	49,752	726579	0,0000825788
Total	95820				0,0018311978

회수관

2) F아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	69120	5,821	2,910	---	---
10,0	2820	17,477	8,738	---	---
15,0	330	29,152	14,576	93042107	0,0000035468
20,0	150	40,846	20,423	17229373	0,0000087061
25,0	150	52,559	26,279	4930239	0,0000304245
30,0	60	64,290	32,145	2693908	0,0000222725
35,0	60	76,038	38,019	1628207	0,0000368504
40,0	60	87,803	43,901	1057508	0,0000567372
45,0	30	99,504	49,752	726579	0,0000412894
50,0	90	111,204	55,602	520532	0,0001729002
55,0	570	122,901	61,451	385598	0,0014782243
60,0	480	134,597	67,298	293562	0,0016350899
65,0	360	146,290	73,145	228644	0,0015744995
70,0	270	158,070	79,035	181240	0,0014897370
Total	74550				0,0065502775

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	90960	5,821	2,910	---	---
10,0	3300	17,477	8,738	---	---
15,0	1020	29,152	14,576	93042107	0,0000109628
20,0	750	40,846	20,423	17229373	0,0000435304
25,0	120	52,559	26,279	4930239	0,0000243396
30,0	30	64,290	32,145	2693908	0,0000111363
Total	96180				0,0000899691

회수관

3) G아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5.0	87810	5,821	2,910	---	---
10.0	6210	17,477	8,738	---	---
15.0	1500	29,152	14,576	93042107	0,0000161218
20.0	420	40,846	20,423	17229373	0,0000243770
25.0	180	52,559	26,279	4930239	0,0000365094
30.0	360	64,290	32,145	2693908	0,0001336349
35.0	330	76,038	38,019	1628207	0,0002026770
40.0	600	87,803	43,901	1057508	0,0005673714
45.0	780	99,504	49,752	726579	0,0010735239
50.0	390	111,204	55,602	520532	0,0007492340
55.0	270	122,901	61,451	385598	0,0007002115
60.0	30	134,597	67,298	293562	0,0001021932
Total	98880				0,0036058539

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5.0	92520	5,821	2,910	---	---
10.0	2070	17,477	8,738	---	---
15.0	270	29,152	14,576	93042107	0,0000029020
Total	94860				0,0000029021

회수관

4) H아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	109440	5,821	2,910	---	---
10,0	6180	17,477	8,738	---	---
15,0	1710	29,152	14,576	93042107	0,0000183788
20,0	840	40,846	20,423	17229373	0,0000487540
25,0	300	52,559	26,279	4930239	0,0000608490
30,0	270	64,290	32,145	2693908	0,0001002262
Total	118740				0,0002282080

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	87120	5,821	2,910	---	---
10,0	6480	17,477	8,738	---	---
15,0	1200	29,152	14,576	93042107	0,0000128974
20,0	150	40,846	20,423	17229373	0,0000087061
25,0	30	52,559	26,279	4930239	0,0000060849
Total	94980				0,0000276885

회수관

5) I아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	87000	5,821	2,910	---	---
10,0	5250	17,477	8,738	---	---
15,0	1650	29,152	14,576	93042107	0,0000177340
20,0	1110	40,846	20,423	17229373	0,0000644249
25,0	810	52,559	26,279	4930239	0,0001642923
30,0	570	64,290	32,145	2693908	0,0002115886
35,0	300	76,038	38,019	1628207	0,0001842518
40,0	120	87,803	43,901	1057508	0,0001134743
45,0	150	99,504	49,752	726579	0,0002064469
50,0	60	111,204	55,602	520532	0,0001152668
55,0	120	122,901	61,451	385598	0,0003112052
60,0	30	134,597	67,298	293562	0,0001021932
65,0	30	146,290	73,145	228644	0,0001312083
70,0	300	158,070	79,035	181240	0,0016552633
75,0	210	170,012	85,006	145669	0,0014416277
80,0	300	181,984	90,992	118770	0,0025258976
Total	98010				0,0072448744

공급관

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	89040	5,821	2,910	---	---
10,0	5280	17,477	8,738	---	---
15,0	2790	29,152	14,576	93042107	0,0000299865
20,0	990	40,846	20,423	17229373	0,0000574601
25,0	300	52,559	26,279	4930239	0,0000608490
30,0	270	64,290	32,145	2693908	0,0001002262
35,0	360	76,038	38,019	1628207	0,0002211022
40,0	750	87,803	43,901	1057508	0,0007092143
45,0	1470	99,504	49,752	726579	0,0020231796
50,0	600	111,204	55,602	520532	0,0011526677
Total	101850				0,0043546853

회수관

6) J아파트

ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	112170	5,821	2,910	---	---
10,0	2430	17,477	8,738	---	---
15,0	870	29,152	14,576	93042107	0,0000093507
20,0	600	40,846	20,423	17229373	0,0000348243
25,0	180	52,559	26,279	4930239	0,0000365094
30,0	60	64,290	32,145	2693908	0,0000222725
35,0	60	76,038	38,019	1628207	0,0000368504
40,0	630	87,803	43,901	1057508	0,0005957400
45,0	720	99,504	49,752	726579	0,0009909451
50,0	510	111,204	55,602	520532	0,0009797676
55,0	60	122,901	61,451	385598	0,0001556026
60,0	30	134,597	67,298	293562	0,0001021932
65,0	30	146,290	73,145	228644	0,0001312083
Total	118350				0,0030952638

공급관

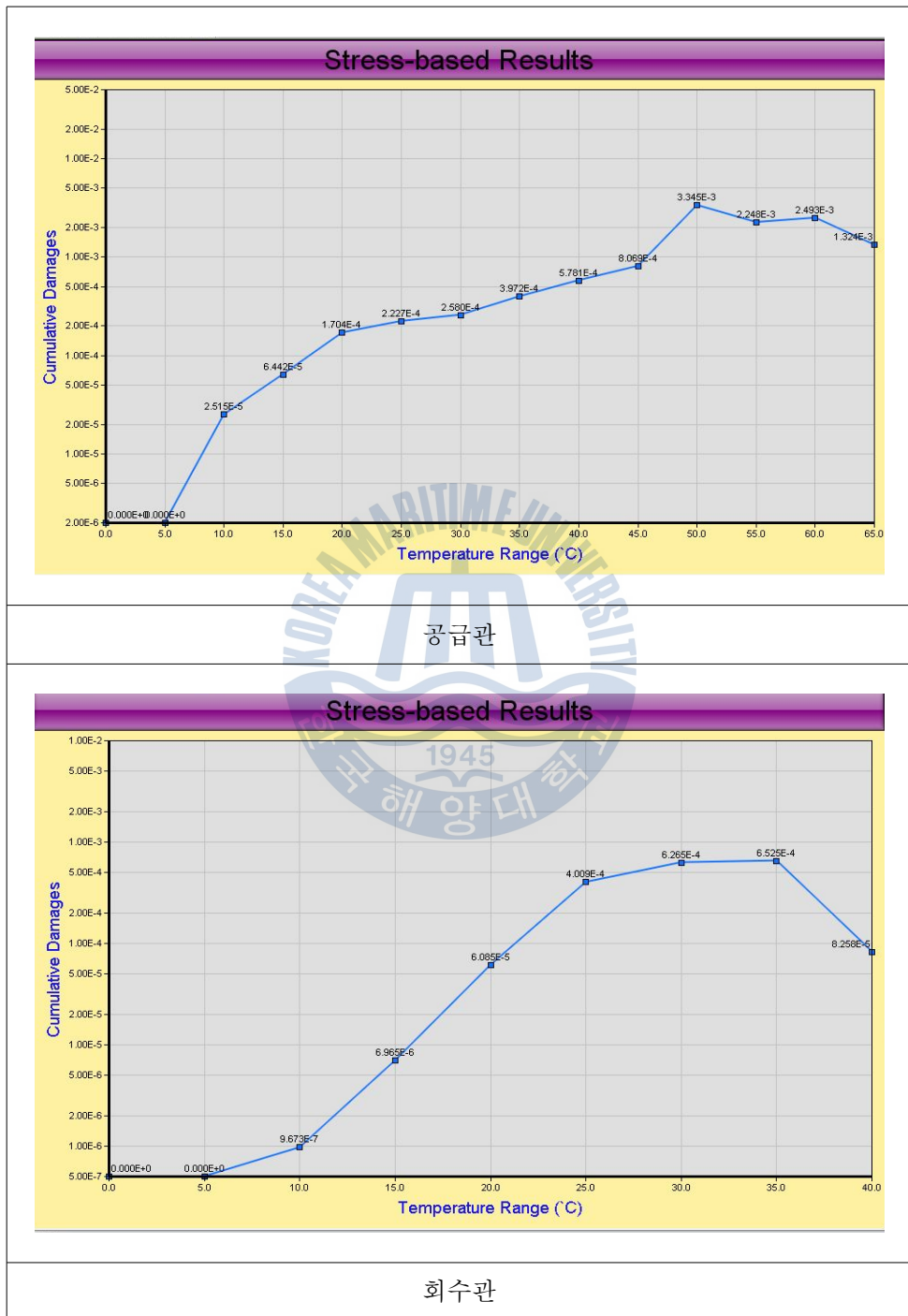
ΔT (°C)	No. of Cycles	Stress Range (MPa)	Stress Amplitude (MPa)	Cycles on S-N Curve	Damage Factor
5,0	129360	5,821	2,910	---	---
10,0	1890	17,477	8,738	---	---
15,0	1290	29,152	14,576	93042107	0,0000138647
20,0	30	40,846	20,423	17229373	0,0000017413
Total	132570				0,0000156061

회수관

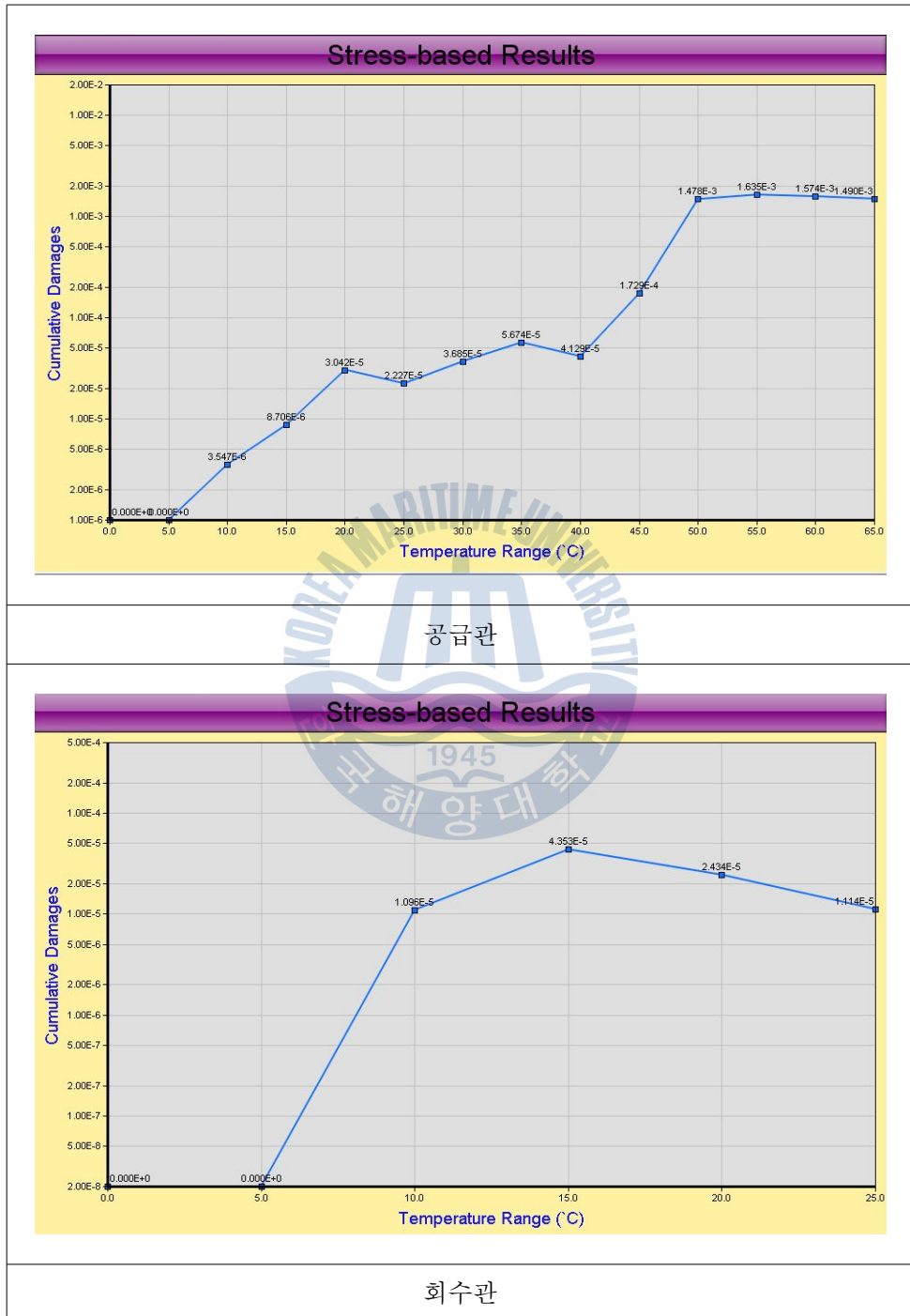
7. 이론식을 이용한 누적손상도 평가



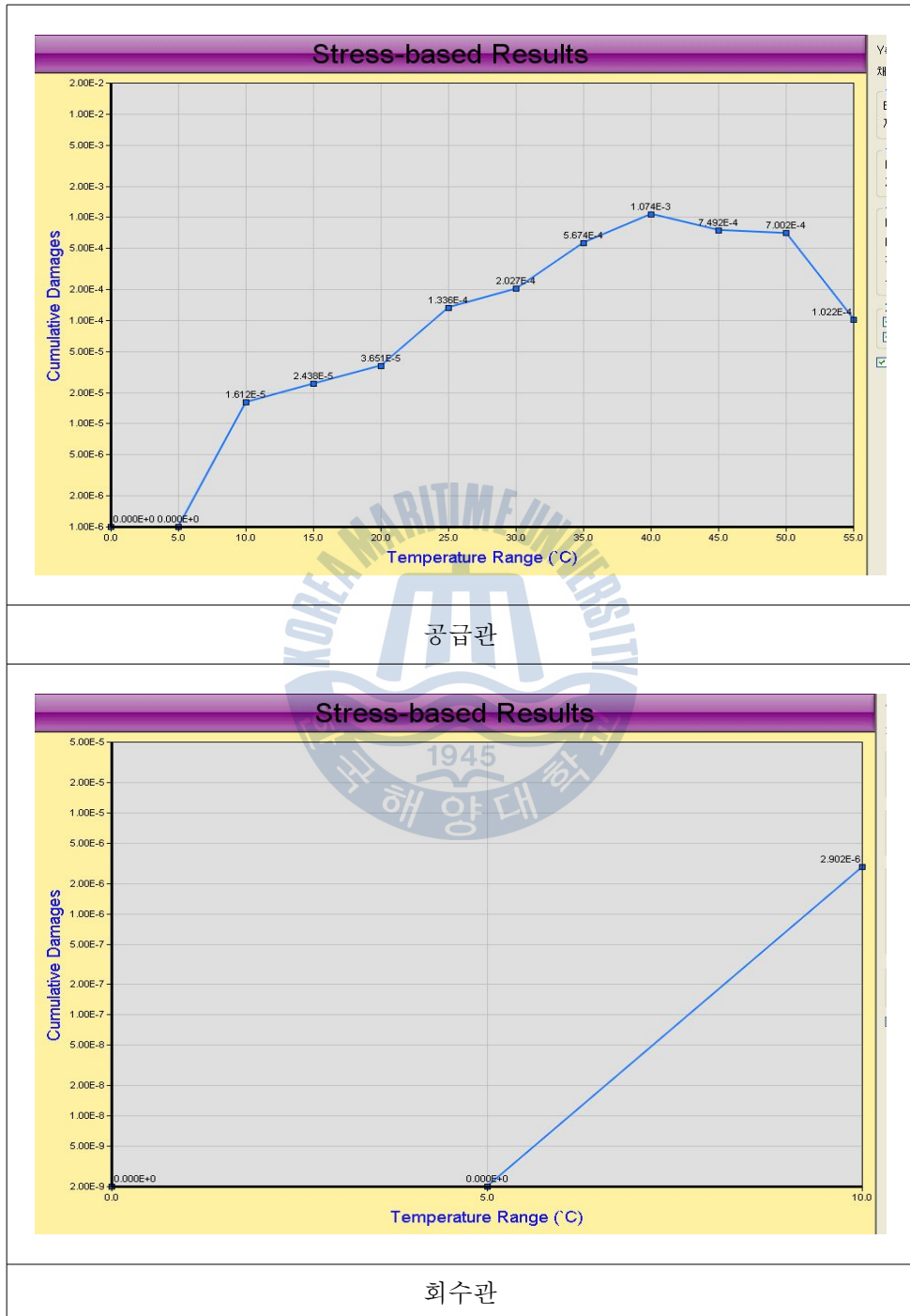
1) E아파트



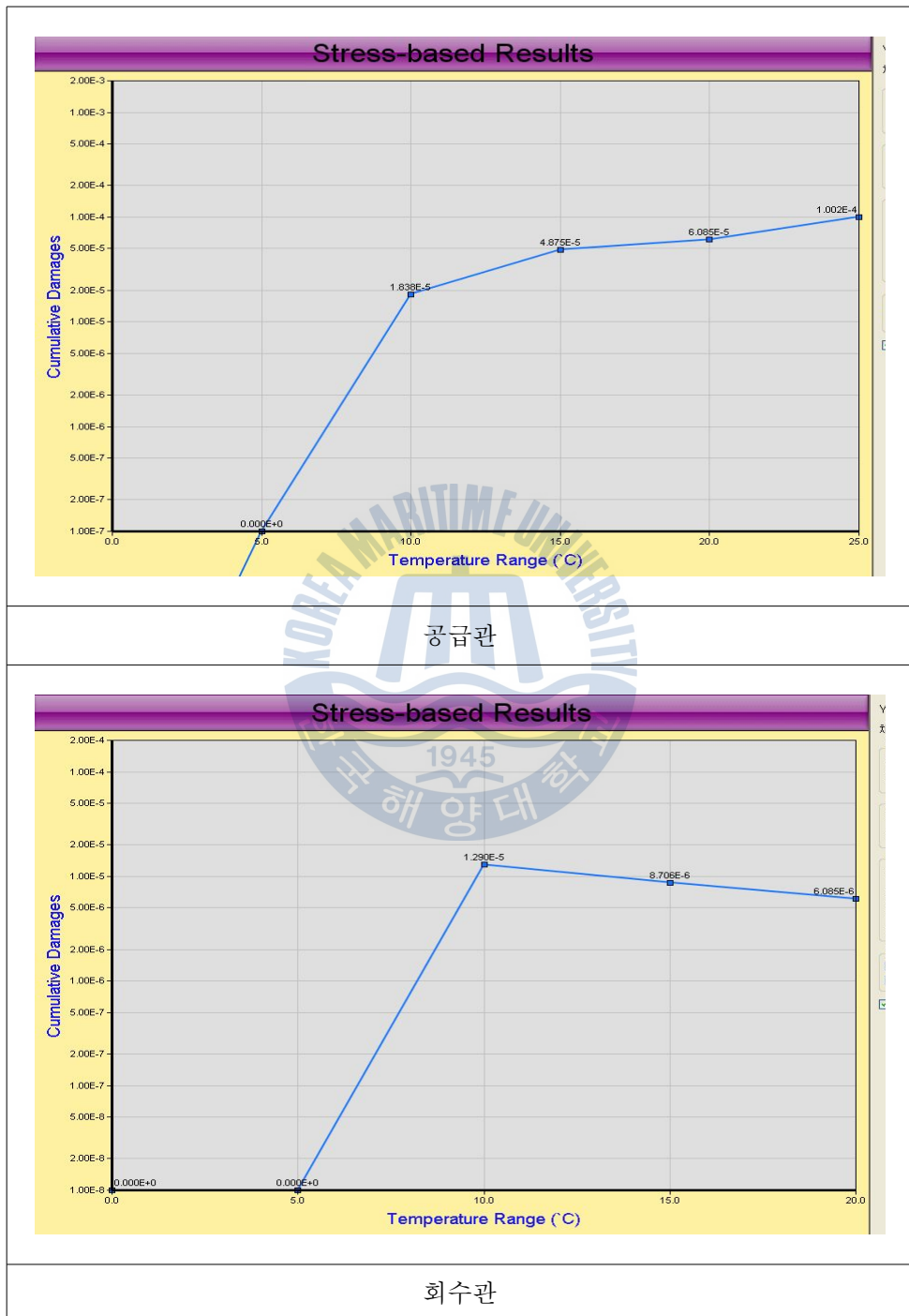
2) F아파트



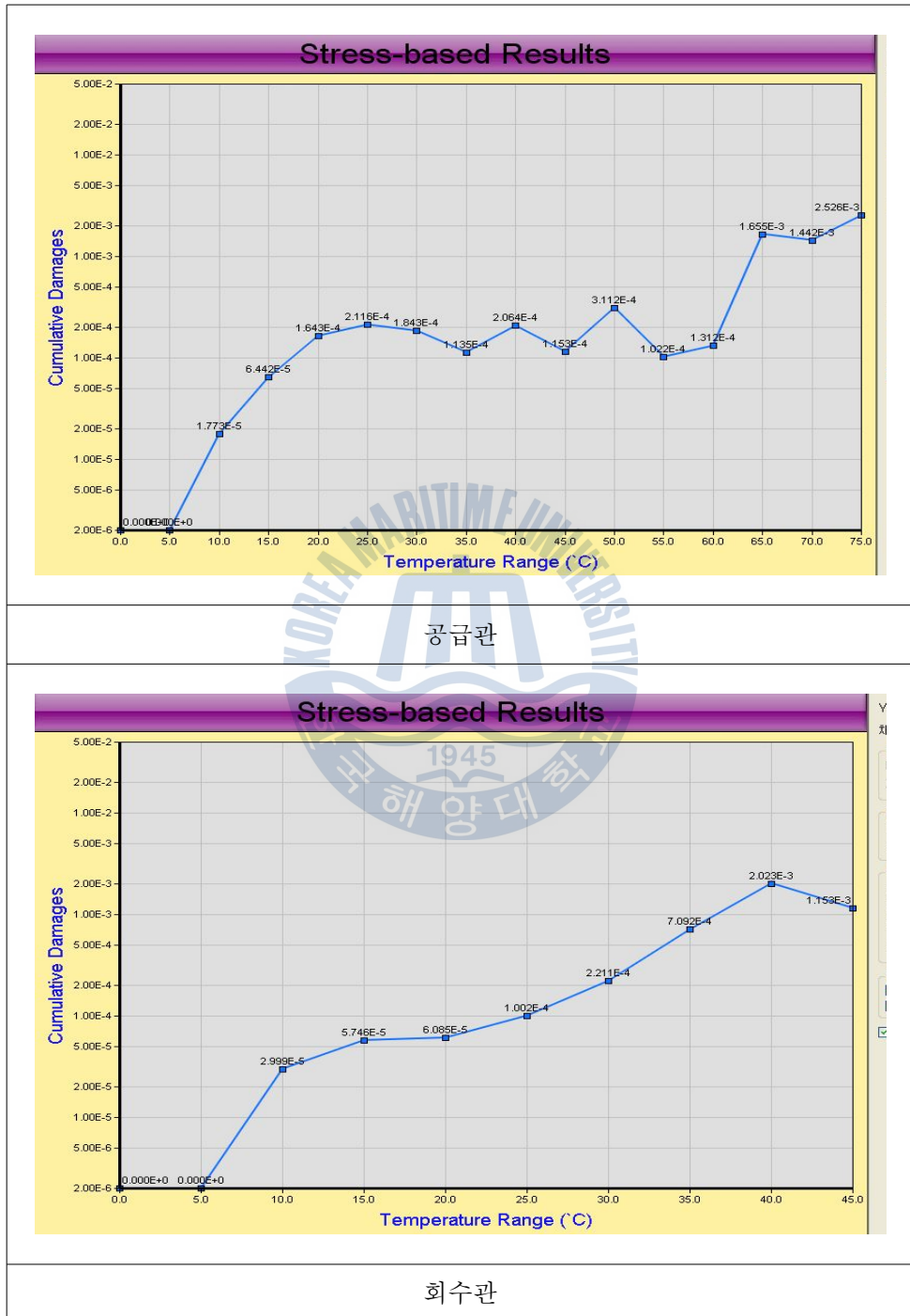
3) G아파트



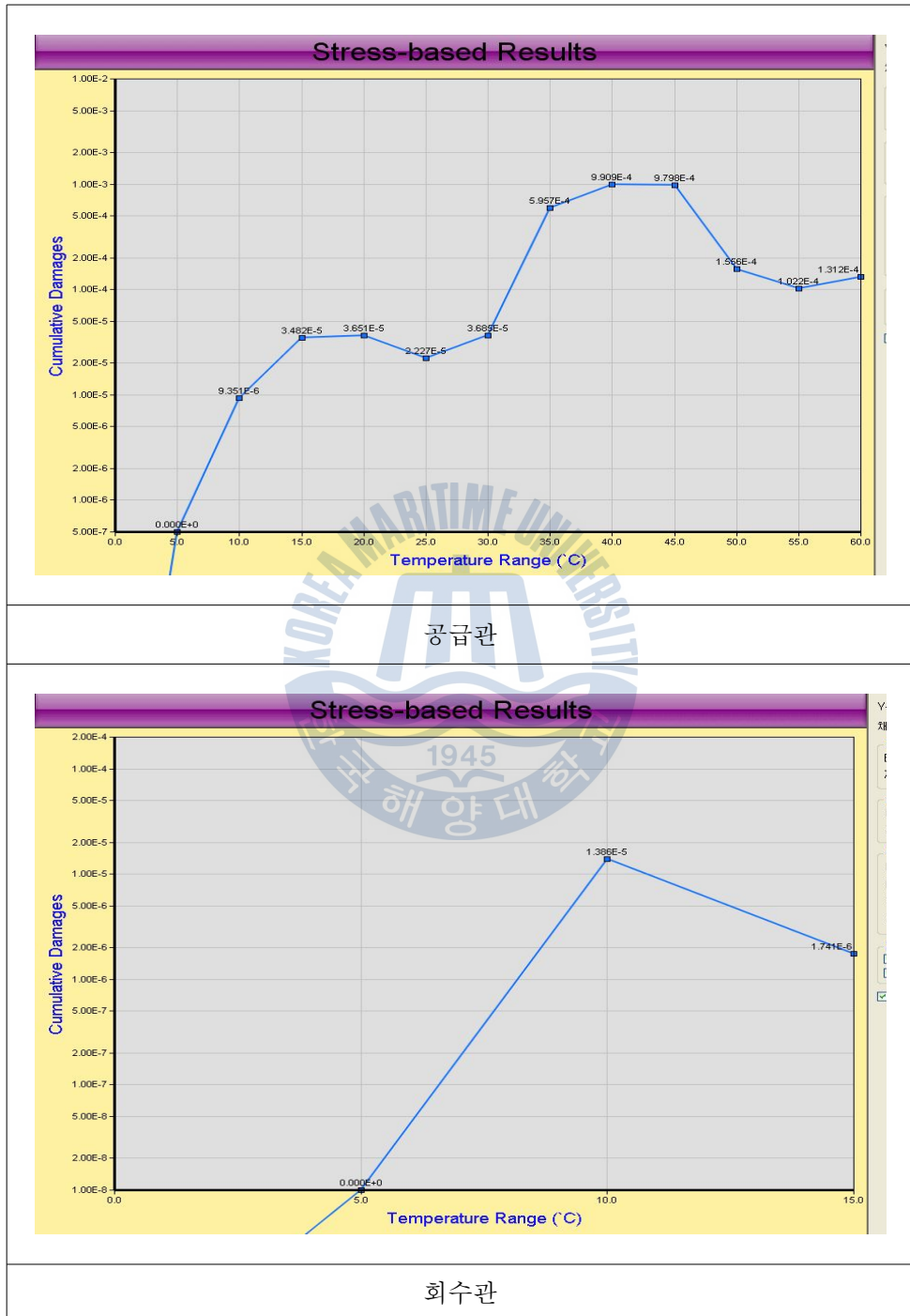
4) H아파트



5) I아파트



6) J아파트



8. 유한요소해석을 이용한 누적손상도 계산



8.1 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위



유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위

0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
5	5.9	5.9	6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.9	7.0	7.1	7.2	7.3	7.5	7.6	7.8	7.9	8.0	8.1	8.3
10	17.6	17.7	17.8	18.0	18.1	18.3	18.5	18.8	19.0	19.2	19.5	19.7	19.9	20.2	20.4	20.7	21.0	21.3	21.6	21.7	22.0	22.2
15	29.2	29.3	29.4	29.6	27.2	27.4	30.1	30.3	30.5	30.8	31.1	31.2	31.5	31.7	31.9	32.2	32.5	32.8	33.0	33.2	33.4	33.6
20	40.7	40.8	41.0	41.2	38.8	39.0	41.7	41.9	42.1	42.3	42.6	42.8	43.0	43.3	43.5	43.7	44.0	44.2	44.5	44.7	44.9	44.9
25	52.2	52.4	52.6	52.7	52.9	53.1	53.3	53.4	53.6	53.9	54.2	54.3	54.5	54.8	55.0	55.2	55.5	55.7	56.0	56.1	56.4	56.3
30	63.8	64.0	64.2	64.3	64.5	64.7	64.8	65.0	65.2	65.5	65.7	65.9	66.1	66.3	66.5	66.8	67.0	67.2	67.5	67.6	67.8	67.8
35	75.4	75.6	75.7	75.9	76.0	76.2	76.4	76.6	76.8	77.1	77.3	77.4	77.6	77.9	78.1	78.3	78.5	78.7	78.9	79.1	79.3	79.3
40	87.1	87.2	87.3	87.5	87.6	87.8	88.0	88.2	88.4	88.6	88.8	89.0	89.2	89.4	89.6	89.8	90.0	90.2	90.4	90.6	90.7	90.8
45	98.6	98.7	98.9	99.0	99.2	99.4	99.6	99.7	99.9	100.2	100.4	100.5	100.7	100.9	101.1	101.3	101.5	101.7	101.9	102.0	102.2	102.3
50	110.1	110.3	110.5	110.6	110.8	111.0	111.2	111.3	111.5	111.7	111.9	112.1	112.2	112.4	112.6	112.8	113.1	113.2	113.3	113.5	113.7	113.8
55	121.7	121.9	122.1	122.2	122.4	122.6	122.8	122.9	123.1	123.3	123.4	123.6	123.8	124.0	124.1	124.3	124.5	124.7	124.8	125.0	125.1	125.3
60	133.3	133.5	133.7	133.8	134.0	134.2	134.3	134.5	134.7	134.9	135.0	135.2	135.3	135.5	135.7	135.9	136.0	136.2	136.4	136.5	136.7	136.9
65	144.9	145.1	145.3	145.4	145.6	145.8	145.9	146.1	146.3	146.5	146.6	146.8	146.9	147.1	147.4	147.5	147.7	147.8	148.0	148.1	148.3	148.4
70	156.5	156.7	156.9	157.0	157.2	157.4	157.5	157.7	157.9	158.1	158.2	158.3	158.5	158.7	158.9	159.0	159.2	159.4	159.5	159.7	159.8	160.0
75	168.1	168.3	168.5	168.6	168.8	169.0	169.1	169.2	169.4	169.7	169.8	169.9	170.1	170.3	170.4	170.6	170.8	170.9	171.1	171.2	171.4	171.6
80	179.6	179.9	180.1	180.2	180.4	180.5	180.7	180.8	181.0	181.2	181.4	181.5	181.7	181.9	182.0	182.2	182.3	182.5	182.7	182.8	183.0	183.2
85	191.3	191.5	191.6	191.8	192.0	192.1	192.3	192.4	192.6	192.8	193.0	193.1	193.3	193.5	193.6	193.8	193.9	194.1	194.3	194.4	194.6	194.8
90	202.9	203.0	203.2	203.3	203.5	203.7	203.9	204.0	204.2	204.4	204.6	204.7	204.8	205.0	205.2	205.4	205.5	205.7	205.8	206.0	206.2	206.3
95	214.4	214.6	214.8	214.9	215.1	215.3	215.4	215.6	215.8	216.0	216.2	216.3	216.4	216.6	216.8	216.9	217.1	217.3	217.4	217.6	217.8	217.9
100	226.0	226.2	226.4	226.5	226.7	226.9	227.0	227.2	227.3	227.6	227.7	227.8	228.0	228.2	228.3	228.5	228.7	228.9	229.0	229.2	229.3	229.5
105	237.6	237.8	238.0	238.1	238.3	238.5	238.6	238.8	238.9	239.2	239.3	239.4	239.6	239.8	239.9	240.1	240.3	240.4	240.6	240.7	240.9	241.1
110	249.2	249.4	249.6	249.7	249.9	250.1	250.2	250.4	250.5	250.8	250.9	251.0	251.2	251.4	251.5	251.7	251.8	252.0	252.2	252.3	252.5	252.7

8.2 개별온도사이클에 대한 누적손상도



1) E아파트

공급관

Each temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
70	70	158.7	79.3	2	60	1.79E+05	3.35E-04
70	65	158.5	79.3	6	180	1.80E+05	1.00E-03
65	70	147.1	73.6	2	60	2.25E+05	2.67E-04
65	65	146.9	73.5	17	510	2.26E+05	2.26E-03
60	65	135.3	67.7	17	510	2.89E+05	1.77E-03
60	60	135.2	67.6	5	150	2.90E+05	5.17E-04
55	70	124.0	62.0	1	30	3.76E+05	7.98E-05
55	60	123.6	61.8	31	930	3.79E+05	2.46E-03
55	55	123.4	61.7	11	330	3.81E+05	8.66E-04
50	75	112.6	56.3	2	60	5.02E+05	1.20E-04
50	70	112.4	56.2	2	60	5.04E+05	1.19E-04
50	60	112.1	56.0	6	180	5.08E+05	3.54E-04
50	55	111.9	56.0	3	90	5.11E+05	1.76E-04
45	75	101.1	50.5	8	240	6.94E+05	3.46E-04
45	70	100.9	50.4	4	120	6.98E+05	1.72E-04
45	55	100.4	50.2	2	60	7.08E+05	8.48E-05
40	80	89.8	44.9	2	60	9.88E+05	6.08E-05
40	75	89.6	44.8	10	300	9.97E+05	3.01E-04
40	70	89.4	44.7	2	60	1.00E+06	5.98E-05
35	85	78.5	39.3	2	60	1.48E+06	4.06E-05
35	80	78.3	39.2	9	270	1.49E+06	1.81E-04
35	75	78.1	39.0	3	90	1.51E+06	5.98E-05
30	95	67.5	33.7	2	60	2.33E+06	2.57E-05
30	90	67.2	33.6	2	60	2.36E+06	2.54E-05
30	85	67.0	33.5	1	30	2.38E+06	1.26E-05
30	80	66.8	33.4	12	360	2.40E+06	1.50E-04
30	75	66.5	33.3	1	30	2.43E+06	1.23E-05
30	70	66.3	33.2	2	60	2.46E+06	2.44E-05
25	95	56.0	28.0	12	360	4.09E+06	8.81E-05
25	90	55.7	27.9	4	120	4.14E+06	2.90E-05
25	85	55.5	27.7	4	120	4.19E+06	2.86E-05
25	80	55.2	27.6	8	240	4.25E+06	5.65E-05
20	100	44.7	22.3	3	90	1.10E+07	8.16E-06
20	95	44.5	22.2	9	270	1.13E+07	2.40E-05
20	90	44.2	22.1	2	60	1.16E+07	5.18E-06
20	85	44.0	22.0	13	390	1.19E+07	3.27E-05
20	80	43.7	21.9	6	180	1.23E+07	1.47E-05
20	70	43.3	21.6	4	120	1.29E+07	9.27E-06
15	105	33.4	16.7	1	30	4.69E+07	6.40E-07
15	100	33.2	16.6	9	270	4.86E+07	5.56E-06
15	95	33.0	16.5	12	360	4.99E+07	7.22E-06
15	90	32.8	16.4	23	690	5.20E+07	1.33E-05
15	85	32.5	16.2	30	900	5.43E+07	1.66E-05
15	80	32.2	16.1	3	90	5.65E+07	1.59E-06
						CUF	1.22E-02

회수관

[illegible]

2) F아파트

공급관

Each temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
90	45	204.2	102.1	1	30	8.41E+04	3.57E-04
70	70	158.7	79.3	7	210	1.79E+05	1.17E-03
70	65	158.5	79.3	2	60	1.80E+05	3.34E-04
70	60	158.3	79.2	2	60	1.80E+05	3.33E-04
65	70	147.1	73.6	3	90	2.25E+05	4.00E-04
65	65	146.9	73.5	9	270	2.26E+05	1.20E-03
65	60	146.8	73.4	1	30	2.26E+05	1.32E-04
60	75	135.7	67.9	1	30	2.86E+05	1.05E-04
60	70	135.5	67.8	2	60	2.88E+05	2.09E-04
60	65	135.3	67.7	12	360	2.89E+05	1.25E-03
60	60	135.2	67.6	3	90	2.90E+05	3.10E-04
55	70	124.0	62.0	2	60	3.76E+05	1.60E-04
55	65	123.8	61.9	17	510	3.77E+05	1.35E-03
50	70	112.4	56.2	1	30	5.04E+05	5.95E-05
50	65	112.2	56.1	3	90	5.06E+05	1.78E-04
45	70	100.9	50.4	1	30	6.98E+05	4.30E-05
40	80	89.8	44.9	1	30	9.88E+05	3.04E-05
40	70	89.4	44.7	1	30	1.00E+06	2.99E-05
35	80	78.3	39.2	1	30	1.49E+06	2.01E-05
35	65	77.6	38.8	1	30	1.53E+06	1.96E-05
30	90	67.2	33.6	1	30	2.36E+06	1.27E-05
30	85	67.0	33.5	1	30	2.38E+06	1.26E-05
25	95	56.0	28.0	5	150	4.09E+06	3.67E-05
25	90	55.7	27.9	1	30	4.14E+06	7.24E-06
20	95	44.5	22.2	4	120	1.13E+07	1.07E-05
20	60	42.8	21.4	1	30	1.37E+07	2.19E-06
15	100	33.2	16.6	3	90	4.86E+07	1.85E-06
15	95	33.0	16.5	6	180	4.99E+07	3.61E-06
15	10	29.3	14.6	1	30	9.15E+07	3.28E-07
						CUF	7.77E-03

회수관

[illegible]

3) G아파트

공급관

Each temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
60	80	135.9	67.9	1	30	2.85E+05	1.05E-04
55	85	124.5	62.3	2	60	3.71E+05	1.62E-04
55	80	124.3	62.2	7	210	3.73E+05	5.64E-04
50	90	113.2	56.6	1	30	4.94E+05	6.08E-05
50	85	113.1	56.5	7	210	4.95E+05	4.24E-04
50	80	112.8	56.4	3	90	4.98E+05	1.81E-04
50	75	112.6	56.3	2	60	5.02E+05	1.20E-04
45	90	101.7	50.8	5	150	6.81E+05	2.20E-04
45	85	101.5	50.8	18	540	6.84E+05	7.90E-04
45	80	101.3	50.7	3	90	6.88E+05	1.31E-04
40	90	90.2	45.1	7	210	9.75E+05	2.15E-04
40	85	90.0	45.0	5	150	9.81E+05	1.53E-04
40	80	89.8	44.9	7	210	9.88E+05	2.13E-04
40	75	89.6	44.8	1	30	9.97E+05	3.01E-05
35	90	78.7	39.4	1	30	1.47E+06	2.04E-05
35	85	78.5	39.3	3	90	1.48E+06	6.09E-05
35	80	78.3	39.2	7	210	1.49E+06	1.41E-04
30	95	67.5	33.7	5	150	2.33E+06	6.43E-05
30	90	67.2	33.6	1	30	2.36E+06	1.27E-05
30	85	67.0	33.5	6	180	2.38E+06	7.56E-05
25	100	56.1	28.1	2	60	4.04E+06	1.48E-05
25	95	56.0	28.0	2	60	4.09E+06	1.47E-05
25	85	55.5	27.7	2	60	4.19E+06	1.43E-05
20	100	44.7	22.3	2	60	1.10E+07	5.44E-06
20	95	44.5	22.2	1	30	1.13E+07	2.66E-06
20	90	44.2	22.1	3	90	1.16E+07	7.77E-06
20	85	44.0	22.0	7	210	1.19E+07	1.76E-05
20	80	43.7	21.9	1	30	1.23E+07	2.45E-06
15	105	33.4	16.7	2	60	4.69E+07	1.28E-06
15	100	33.2	16.6	4	120	4.86E+07	2.47E-06
15	95	33.0	16.5	3	90	4.99E+07	1.80E-06
15	90	32.8	16.4	5	150	5.20E+07	2.88E-06
15	85	32.5	16.2	25	750	5.43E+07	1.38E-05
15	80	32.2	16.1	9	270	5.65E+07	4.78E-06
15	75	31.9	16.0	1	30	5.91E+07	5.08E-07
15	70	31.7	15.9	1	30	6.12E+07	4.90E-07
						CUF	3.85E-03

회수관

[illegible]

4) H아파트

공급관

Each temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
30	105	67.8	33.9	6	180	2.29E+06	7.85E-05
30	100	67.6	33.8	3	90	2.31E+06	3.89E-05
25	110	56.3	28.2	1	30	4.01E+06	7.49E-06
25	105	56.4	28.2	9	270	4.00E+06	6.75E-05
20	110	44.9	22.5	6	180	1.07E+07	1.68E-05
20	105	44.9	22.5	15	450	1.07E+07	4.19E-05
20	100	44.7	22.3	6	180	1.10E+07	1.63E-05
20	95	44.5	22.2	1	30	1.13E+07	2.66E-06
15	115	33.6	16.8	2	60	4.58E+07	1.31E-06
15	110	33.6	16.8	13	390	4.58E+07	8.51E-06
15	105	33.4	16.7	27	810	4.69E+07	1.73E-05
15	100	33.2	16.6	14	420	4.86E+07	8.65E-06
15	95	33.0	16.5	1	30	4.99E+07	6.01E-07
						CUF	3.06E-04

회수관

Each temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
25	45	53.6	26.8	1	30	4.64E+06	6.46E-06
20	45	42.1	21.0	1	30	1.49E+07	2.02E-06
20	40	41.9	20.9	4	120	1.52E+07	7.89E-06
15	50	30.8	15.4	5	150	7.10E+07	2.11E-06
15	45	30.5	15.3	4	120	7.39E+07	1.62E-06
15	40	30.3	15.2	31	930	7.64E+07	1.22E-05
						CUF	3.23E-05

5) I아파트

공급관

Each temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
80	70	181.9	90.9	9	270	1.19E+05	2.27E-03
80	65	181.7	90.8	1	30	1.19E+05	2.51E-04
75	70	170.3	85.1	5	150	1.45E+05	1.03E-03
75	65	170.1	85.0	2	60	1.45E+05	4.12E-04
70	70	158.7	79.3	1	30	1.79E+05	1.67E-04
70	65	158.5	79.3	9	270	1.80E+05	1.50E-03
65	75	147.4	73.7	1	30	2.24E+05	1.34E-04
60	75	135.7	67.9	1	30	2.86E+05	1.05E-04
55	75	124.1	62.1	1	30	3.74E+05	8.01E-05
55	70	124.0	62.0	2	60	3.76E+05	1.60E-04
55	55	123.4	61.7	1	30	3.81E+05	7.88E-05
50	85	113.1	56.5	1	30	4.95E+05	6.06E-05
50	70	112.4	56.2	1	30	5.04E+05	5.95E-05
45	85	101.5	50.8	1	30	6.84E+05	4.39E-05
45	80	101.3	50.7	2	60	6.88E+05	8.72E-05
45	75	101.1	50.5	2	60	6.94E+05	8.65E-05
40	85	90.0	45.0	1	30	9.81E+05	3.06E-05
40	80	89.8	44.9	3	90	9.88E+05	9.11E-05
35	95	78.9	39.5	1	30	1.46E+06	2.06E-05
35	90	78.7	39.4	2	60	1.47E+06	4.09E-05
35	85	78.5	39.3	3	90	1.48E+06	6.09E-05
35	80	78.3	39.2	3	90	1.49E+06	6.04E-05
35	55	77.3	38.6	1	30	1.55E+06	1.93E-05
30	100	67.6	33.8	3	90	2.31E+06	3.89E-05
30	95	67.5	33.7	5	150	2.33E+06	6.43E-05
30	90	67.2	33.6	2	60	2.36E+06	2.54E-05
30	85	67.0	33.5	3	90	2.38E+06	3.78E-05
30	80	66.8	33.4	2	60	2.40E+06	2.50E-05
30	65	66.1	33.0	1	30	2.48E+06	1.21E-05
30	60	65.9	32.9	1	30	2.50E+06	1.20E-05
30	55	65.7	32.9	1	30	2.52E+06	1.19E-05
30	50	65.5	32.7	1	30	2.55E+06	1.18E-05
25	100	56.1	28.1	7	210	4.04E+06	5.19E-05
25	95	56.0	28.0	5	150	4.09E+06	3.67E-05
25	90	55.7	27.9	3	90	4.14E+06	2.17E-05
25	85	55.5	27.7	3	90	4.19E+06	2.15E-05
25	70	54.8	27.4	1	30	4.36E+06	6.88E-06
25	65	54.5	27.3	3	90	4.42E+06	2.04E-05
25	60	54.3	27.2	2	60	4.46E+06	1.34E-05
25	55	54.2	27.1	1	30	4.51E+06	6.66E-06
25	50	53.9	26.9	2	60	4.58E+06	1.31E-05
20	100	44.7	22.3	8	240	1.10E+07	2.18E-05
20	95	44.5	22.2	1	30	1.13E+07	2.66E-06
20	90	44.2	22.1	3	90	1.16E+07	7.77E-06
20	85	44.0	22.0	1	30	1.19E+07	2.52E-06
20	75	43.5	21.7	2	60	1.27E+07	4.74E-06
20	70	43.3	21.6	7	210	1.29E+07	1.62E-05
20	65	43.0	21.5	6	180	1.33E+07	1.35E-05
20	60	42.8	21.4	4	120	1.37E+07	8.77E-06
20	55	42.6	21.3	4	120	1.40E+07	8.59E-06
20	45	42.1	21.0	1	30	1.49E+07	2.02E-06
15	105	33.4	16.7	7	210	4.69E+07	4.48E-06
15	100	33.2	16.6	7	210	4.86E+07	4.32E-06
15	95	33.0	16.5	5	150	4.99E+07	3.01E-06
15	90	32.8	16.4	7	210	5.20E+07	4.04E-06
15	85	32.5	16.2	1	30	5.43E+07	5.52E-07
15	75	31.9	16.0	6	180	5.91E+07	3.05E-06
15	70	31.7	15.9	7	210	6.12E+07	3.43E-06
15	65	31.5	15.7	3	90	6.37E+07	1.41E-06
15	60	31.2	15.6	3	90	6.60E+07	1.36E-06
15	55	31.1	15.5	3	90	6.79E+07	1.33E-06
15	45	30.5	15.3	3	90	7.39E+07	1.22E-06
15	40	30.3	15.2	2	60	7.64E+07	7.85E-07
15	35	30.1	15.1	1	30	7.93E+07	3.78E-07
CUF							7.40E-03

[illegible]

6) J아파트

공급관

Each temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
65	70	147.1	73.6	1	30	2.25E+05	1.33E-04
60	70	135.5	67.8	1	30	2.88E+05	1.04E-04
55	70	124.0	62.0	1	30	3.76E+05	7.98E-05
55	60	123.6	61.8	1	30	3.79E+05	7.92E-05
50	65	112.2	56.1	1	30	5.06E+05	5.92E-05
50	60	112.1	56.0	16	480	5.08E+05	9.44E-04
45	75	101.1	50.5	1	30	6.94E+05	4.33E-05
45	65	100.7	50.3	3	90	7.01E+05	1.28E-04
45	60	100.5	50.3	20	600	7.05E+05	8.52E-04
40	65	89.2	44.6	6	180	1.01E+06	1.78E-04
40	60	89.0	44.5	15	450	1.02E+06	4.43E-04
35	70	77.9	38.9	1	30	1.52E+06	1.98E-05
35	65	77.6	38.8	1	30	1.53E+06	1.96E-05
30	75	66.5	33.3	1	30	2.43E+06	1.23E-05
30	70	66.3	33.2	1	30	2.46E+06	1.22E-05
25	80	55.2	27.6	3	90	4.25E+06	2.12E-05
25	75	55.0	27.5	1	30	4.31E+06	6.95E-06
25	55	54.2	27.1	2	60	4.51E+06	1.33E-05
20	90	44.2	22.1	1	30	1.16E+07	2.59E-06
20	80	43.7	21.9	15	450	1.23E+07	3.67E-05
20	70	43.3	21.6	2	60	1.29E+07	4.63E-06
20	50	42.3	21.2	2	60	1.44E+07	4.16E-06
15	95	33.0	16.5	1	30	4.99E+07	6.01E-07
15	85	32.5	16.2	3	90	5.43E+07	1.66E-06
15	80	32.2	16.1	15	450	5.65E+07	7.97E-06
15	75	31.9	16.0	6	180	5.91E+07	3.05E-06
15	70	31.7	15.9	2	60	6.12E+07	9.80E-07
15	50	30.8	15.4	1	30	7.10E+07	4.23E-07
15	45	30.5	15.3	1	30	7.39E+07	4.06E-07
						CUF	3.21E-03

회수관

[illegible]

8.3 등가전온도사이클에 대한 누적손상도



1) E아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	85	251.8	125.9		507	4.48E+04	1.13E-02
						CUF	1.13E-02

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	45	250.5	125.3		79	4.55E+04	1.74E-03
						CUF	1.74E-03

2) F아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	75	251.5	125.8		277	4.50E+04	6.16E-03
						CUF	6.16E-03

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	45	250.5	125.3		8	4.55E+04	1.76E-04
						CUF	1.76E-04

3) G아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	95	252.2	126.1		156	4.46E+04	3.49E-03
						CUF	3.49E-03

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	35	250.2	125.1		2	4.57E+04	4.38E-05
						CUF	4.38E-05

4) H아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	110	252.7	126.3		16	4.44E+04	3.61E-04
						CUF	3.61E-04

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	40	250.4	125.2		6	4.56E+04	1.32E-04
						CUF	1.32E-04

5) I아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	90	252.0	126.0		309	4.47E+04	6.91E-03
						CUF	6.91E-03

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	50	250.8	125.4		190	4.54E+04	4.19E-03
						CUF	4.19E-03

6) J아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	75	251.5	125.8		129	4.50E+04	2.87E-03
						CUF	2.87E-03

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	40	250.4	125.2		4	4.56E+04	8.77E-05
						CUF	8.77E-05

9. Fitting류 누적손상도 평가



9.1 Elbow형 열배관

가. 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위

Elbow 열배관에 대해 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위

0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
5	2.3	2.2	2.1	2.2	2.1	2.2	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.1	3.4	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8	5.1	5.4
10	7.0	6.9	6.8	6.7	6.6	6.5	6.4	6.4	6.3	6.3	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.3	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7
15	11.8	11.7	11.5	11.4	11.3	11.2	11.0	10.9	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.5	10.4	10.4	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3
20	16.5	16.4	16.2	16.1	16.0	15.9	15.8	15.7	15.5	15.4	15.3	15.2	15.1	15.0	15.0	14.9	14.8	14.7	14.7	14.6	14.5	14.5
25	21.3	21.2	21.0	20.9	20.7	20.6	20.5	20.4	20.2	20.1	20.0	19.9	19.8	19.7	19.6	19.5	19.4	19.3	19.3	19.2	19.1	19.0
30	26.0	25.9	25.7	25.6	25.5	25.3	25.2	25.1	25.0	24.8	24.7	24.6	24.5	24.4	24.3	24.2	24.1	24.0	23.9	23.8	23.7	23.6
35	30.8	30.7	30.5	30.4	30.2	30.1	29.9	29.8	29.7	29.5	29.4	29.3	29.2	29.1	29.0	28.9	28.8	28.7	28.6	28.5	28.4	28.3
40	35.5	35.4	35.2	35.1	35.0	34.8	34.7	34.6	34.5	34.3	34.2	34.0	33.9	33.8	33.7	33.6	33.5	33.4	33.2	33.1	33.0	32.8
45	40.3	40.2	40.0	39.9	39.7	39.6	39.4	39.3	39.2	39.1	38.9	38.8	38.6	38.5	38.4	38.3	38.2	38.1	37.9	37.8	37.7	37.5
50	45.0	44.9	44.7	44.6	44.4	44.3	44.2	44.1	43.9	43.8	43.6	43.5	43.4	43.3	43.2	43.1	42.9	42.7	42.6	42.5	42.4	42.2
55	49.7	49.6	49.5	49.3	49.2	49.0	48.9	48.8	48.6	48.5	48.4	48.3	48.1	48.0	47.9	47.7	47.6	47.5	47.4	47.3	47.2	47.0
60	54.5	54.4	54.2	54.1	53.9	53.8	53.6	53.5	53.3	53.2	53.1	53.0	52.9	52.7	52.6	52.4	52.3	52.2	52.1	52.0	51.9	51.7
65	59.2	59.1	58.9	58.8	58.7	58.6	58.4	58.3	58.2	58.0	57.9	57.8	57.6	57.5	57.4	57.3	57.1	57.0	56.9	56.7	56.6	56.5
70	64.0	63.9	63.7	63.5	63.4	63.2	63.1	63.0	62.9	62.7	62.6	62.4	62.3	62.2	62.1	61.9	61.8	61.7	61.6	61.4	61.3	61.2
75	68.7	68.6	68.4	68.3	68.2	68.0	67.9	67.8	67.6	67.5	67.3	67.2	67.0	66.9	66.8	66.6	66.5	66.4	66.3	66.2	66.0	65.9
80	73.5	73.4	73.2	73.1	72.9	72.7	72.6	72.4	72.2	72.0	72.1	72.0	71.8	71.7	71.5	71.4	71.3	71.2	71.0	70.9	70.7	70.6
85	78.2	78.1	77.9	77.7	77.6	77.5	77.4	77.2	77.1	76.9	76.8	76.7	76.5	76.4	76.3	76.2	76.0	75.9	75.8	75.6	75.5	75.4
90	82.9	82.8	82.7	82.5	82.4	82.2	82.1	82.0	81.9	81.7	81.6	81.5	81.3	81.2	81.0	80.9	80.8	80.6	80.5	80.4	80.3	80.1
95	87.7	87.6	87.4	87.3	87.1	86.9	86.8	86.7	86.6	86.4	86.3	86.2	86.1	85.9	85.8	85.7	85.5	85.4	85.2	85.1	84.9	84.8
100	92.4	92.3	92.1	92.0	91.9	91.7	91.6	91.4	91.3	91.2	91.0	90.9	90.8	90.6	90.5	90.4	90.2	90.1	90.0	89.8	89.7	89.6
105	97.2	97.1	96.9	96.8	96.6	96.5	96.3	96.2	96.0	95.9	95.8	95.7	95.5	95.4	95.3	95.1	95.0	94.9	94.8	94.6	94.4	94.3
110	101.9	101.8	101.6	101.5	101.4	101.2	101.1	100.9	100.8	100.7	100.5	100.3	100.2	100.1	99.9	99.8	99.7	99.5	99.4	99.3	99.1	99.0

나. 등가전 온도사이클수에 대한 누적손상도
계산

1) E아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	85	99.7	49.9		507	7.22E+05	7.02E-04
						CUF	7.02E-04

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	45	100.8	50.4		79	6.99E+05	1.13E-04
						CUF	1.13E-04

2) F아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	75	99.9	50.0		277	7.18E+05	3.86E-04
						CUF	3.86E-04

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	45	100.8	50.4		8	6.99E+05	1.14E-05
						CUF	1.14E-05

3) G아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range	mean	Sint	Salt	n_0	n	N	UF
[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]				
110	95	99.4	49.7		156	7.28E+05	2.14E-04
						CUF	2.14E-04

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range	mean	Sint	Salt	n_0	n	N	UF
[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]				
110	35	101.1	50.5		2	6.93E+05	2.89E-06
						CUF	2.89E-06

4) H아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range	mean	Sint	Salt	n_0	n	N	UF
[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]				
110	110	99.0	49.5		16	7.38E+05	2.17E-05
						CUF	2.17E-05

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range	mean	Sint	Salt	n_0	n	N	UF
[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]				
110	40	100.9	50.5		6	6.97E+05	8.61E-06
						CUF	8.61E-06

5) I아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	90	99.5	49.8		309	7.27E+05	4.25E-04
						CUF	4.25E-04

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	50	100.7	50.3		190	7.02E+05	2.71E-04
						CUF	2.71E-04

6) J아파트

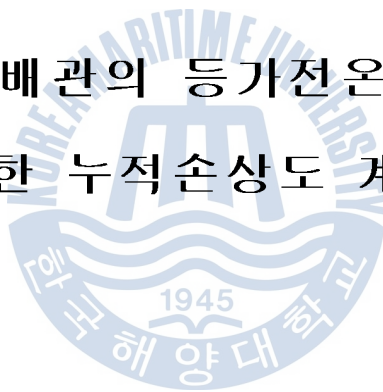
공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	75	99.9	50.0		129	7.18E+05	1.80E-04
						CUF	1.80E-04

회수관

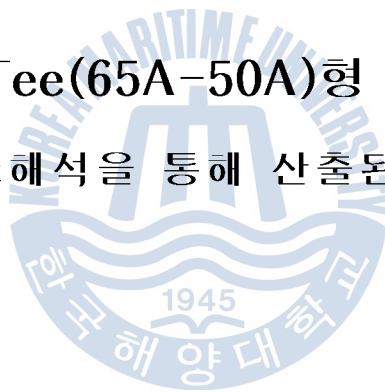
Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	40	100.9	50.5		4	6.97E+05	5.74E-06
						CUF	5.74E-06

9.2 Tee형 열배관의 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 계산



9.2.1 Tee(65A-50A)형 열배관

가. 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위



Tee(65A-50A)형 열배관에 대해 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위

0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
5	20.1	21.0	21.9	22.8	23.7	24.7	25.6	26.5	27.4	28.3	29.2	30.2	31.1	32.0	33.0	33.9	34.8	35.8	36.7	37.6	38.6	39.5
10	59.3	60.2	61.1	62.0	62.9	63.9	64.8	65.7	66.6	67.5	68.4	69.4	70.3	71.2	72.2	73.1	74.0	75.0	75.9	76.8	77.8	78.7
15	98.5	99.4	100.3	101.2	102.1	103.1	104.0	104.9	105.8	106.7	107.6	108.6	109.5	110.4	111.4	112.2	113.2	114.2	115.0	116.0	117.0	117.8
20	137.6	138.6	139.5	140.4	141.3	142.3	143.1	144.1	145.0	145.8	146.8	147.7	148.6	149.5	150.5	151.4	152.3	153.3	154.2	155.1	156.1	157.0
25	176.8	177.7	178.6	179.6	180.5	181.4	182.3	183.2	184.1	185.0	185.9	186.9	187.8	188.7	189.7	190.6	191.5	192.5	193.3	194.3	195.3	196.1
30	216.0	216.9	217.8	218.8	219.7	220.6	221.5	222.4	223.3	224.2	225.1	226.1	227.0	227.9	228.9	229.8	230.7	231.7	232.5	233.5	234.5	235.3
35	255.2	256.1	257.0	257.9	258.8	259.8	260.7	261.6	262.5	263.4	264.3	265.3	266.2	267.1	268.1	268.9	269.9	270.9	271.7	272.7	273.7	274.5
40	294.4	295.3	296.2	297.1	298.0	299.0	299.9	300.8	301.7	302.6	303.5	304.5	305.4	306.3	307.3	308.1	309.1	310.0	310.8	311.8	312.8	313.6
45	333.5	334.5	335.4	336.3	337.2	338.2	339.0	340.0	340.9	341.7	342.7	343.6	344.5	345.4	346.4	347.3	348.2	349.2	350.0	351.0	352.0	352.8
50	372.7	373.7	374.6	375.5	376.4	377.4	378.2	379.2	380.1	381.0	381.9	382.8	383.7	384.6	385.6	386.4	387.4	388.4	389.1	390.2	391.2	391.9
55	411.9	412.9	413.8	414.7	415.6	416.6	417.4	418.4	419.3	420.1	421.1	422.0	422.9	423.8	424.8	425.6	426.6	427.6	428.3	429.4	430.4	431.1
60	451.1	452.0	452.9	453.9	454.8	455.7	456.6	457.5	458.4	459.3	460.2	461.2	462.1	463.0	464.0	464.8	465.8	466.7	467.5	468.5	469.5	470.3
65	490.3	491.2	492.1	493.1	494.0	494.9	495.8	496.7	497.6	498.5	499.4	500.4	501.3	502.2	503.2	504.0	505.0	505.9	506.7	507.7	508.7	509.5
70	529.5	530.4	531.3	532.3	533.2	534.1	535.0	535.9	536.8	537.7	538.6	539.6	540.4	541.4	542.4	543.2	544.2	545.1	545.9	546.9	547.9	548.7
75	568.7	569.6	570.5	571.5	572.4	573.3	574.2	575.1	576.0	576.9	577.8	578.7	579.6	580.5	581.5	582.4	583.3	584.3	585.1	586.1	587.1	587.9
80	607.9	608.8	609.7	610.7	611.6	612.5	613.4	614.3	615.2	616.1	617.0	617.9	618.8	619.7	620.7	621.6	622.5	623.4	624.3	625.2	626.2	627.1
85	647.0	648.0	648.9	649.8	650.7	651.7	652.5	653.5	654.4	655.2	656.2	657.1	658.0	658.9	659.9	660.7	661.7	662.6	663.4	664.4	665.4	666.2
90	686.2	687.2	688.1	689.0	689.9	690.9	691.7	692.7	693.6	694.4	695.4	696.3	697.2	698.1	699.1	699.9	700.9	701.8	702.6	703.6	704.6	705.4
95	725.4	726.3	727.2	728.2	729.1	730.0	730.9	731.8	732.7	733.6	734.5	735.5	736.4	737.3	738.3	739.1	740.1	741.0	741.8	742.8	743.8	744.6
100	764.6	765.5	766.4	767.4	768.3	769.2	770.1	771.0	771.9	772.8	773.7	774.6	775.5	776.4	777.4	778.3	779.2	780.1	781.0	781.9	782.9	783.8
105	803.8	804.7	805.6	806.6	807.5	808.4	809.3	810.2	811.1	812.0	812.9	813.8	814.7	815.6	816.6	817.5	818.4	819.3	820.2	821.1	822.0	823.0
110	843.0	843.9	844.8	845.8	846.7	847.6	848.5	849.4	850.3	851.2	852.1	853.0	853.9	854.8	855.8	856.7	857.6	858.5	859.4	860.3	861.3	862.2

나. 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 계산

1) E아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
110	85	857.6	428.8		507	1.13E+03	4.47E-01
						CUF	4.47E-01

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
110	45	850.3	425.2		79	1.16E+03	6.79E-02
						CUF	6.79E-02

2) F아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
110	75	855.8	427.9		277	1.14E+03	2.43E-01
						CUF	2.43E-01

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
110	45	850.3	425.2		8	1.16E+03	6.87E-03
						CUF	6.87E-03

3) G아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	95	859.4	429.7		156	1.13E+03	1.38E-01
						CUF	1.38E-01

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	35	848.5	424.3		2	1.17E+03	1.71E-03

4) H아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	110	862.2	431.1		16	1.12E+03	1.43E-02
						CUF	1.43E-02

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	40	849.4	424.7		6	1.17E+03	5.14E-03
						CUF	5.14E-03

5) I아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	90	858.5	429.3		309	1.13E+03	2.73E-01
						CUF	2.73E-01

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	50	851.2	425.6		190	1.16E+03	1.64E-01
						CUF	1.64E-01

6) J아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	75	855.8	427.9		129	1.14E+03	1.13E-01
						CUF	1.13E-01

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	40	849.4	424.7		4	1.17E+03	3.42E-03
						CUF	3.42E-03

9.2.2 Tee(65A-65A)형 열배관

가. 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위

Tee(65A-65A)형 열배관에 대해 유한요소해석을 통해 산출된 열응력범위

0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
5	12.2	12.7	13.1	13.6	14.1	14.5	15.0	15.5	15.9	16.4	16.9	17.4	17.9	18.3	18.8	19.3	19.8	20.3	20.8	21.2	21.7	22.2
10	36.2	36.6	37.1	37.6	38.1	38.5	39.0	39.5	39.9	40.4	40.9	41.4	41.9	42.3	42.8	43.3	43.8	44.3	44.8	45.2	45.6	46.2
15	60.2	60.7	61.1	61.6	62.1	62.5	63.0	63.5	63.9	64.4	64.8	65.3	65.8	66.2	66.7	67.2	67.7	68.2	68.7	69.1	69.6	70.1
20	84.1	84.6	85.0	85.5	86.0	86.4	86.9	87.4	87.8	88.3	88.8	89.3	89.8	90.2	90.7	91.2	91.7	92.2	92.7	93.1	93.5	94.1
25	108.1	108.6	109.0	109.5	109.9	110.4	110.9	111.4	111.8	112.3	112.8	113.3	113.8	114.2	114.7	115.2	115.7	116.1	116.6	117.0	117.5	118.0
30	132.1	132.6	133.0	133.5	134.0	134.4	134.9	135.4	135.8	136.3	136.8	137.3	137.7	138.2	138.6	139.1	139.6	140.1	140.6	141.0	141.4	142.0
35	156.1	156.6	157.0	157.5	158.0	158.4	158.9	159.4	159.8	160.3	160.7	161.2	161.7	162.1	162.6	163.1	163.6	164.1	164.6	165.0	165.4	165.9
40	180.1	180.6	181.0	181.5	181.9	182.4	182.8	183.3	183.7	184.2	184.7	185.2	185.7	186.1	186.6	187.1	187.6	188.0	188.5	188.9	189.3	189.9
45	204.0	204.5	204.9	205.4	205.9	206.3	206.8	207.3	207.7	208.2	208.7	209.2	209.6	210.1	210.5	211.0	211.5	212.0	212.5	212.9	213.3	213.9
50	228.0	228.5	228.9	229.4	229.9	230.3	230.8	231.3	231.7	232.2	232.6	233.1	233.6	234.0	234.5	235.0	235.5	236.0	236.5	236.9	237.2	237.8
55	252.0	252.5	252.9	253.4	253.9	254.3	254.8	255.3	255.7	256.1	256.6	257.1	257.6	258.0	258.5	259.0	259.5	259.9	260.4	260.8	261.2	261.8
60	276.0	276.5	276.9	277.4	277.8	278.3	278.7	279.2	279.6	280.1	280.6	281.1	281.5	282.0	282.4	282.9	283.4	283.9	284.4	284.8	285.1	285.7
65	300.0	300.5	300.9	301.4	301.8	302.3	302.7	303.2	303.6	304.1	304.6	305.1	305.5	306.0	306.4	306.9	307.4	307.8	308.3	308.7	309.1	309.7
70	323.9	324.5	324.9	325.3	325.8	326.3	326.7	327.2	327.6	328.0	328.5	329.0	329.5	329.9	330.4	330.9	331.4	331.8	332.3	332.7	333.0	333.6
75	347.9	348.4	348.8	349.3	349.8	350.2	350.7	351.2	351.6	352.0	352.5	353.0	353.4	353.9	354.3	354.8	355.3	355.8	356.3	356.7	357.0	357.6
80	371.9	372.4	372.8	373.3	373.7	374.2	374.6	375.1	375.5	376.0	376.5	377.0	377.4	377.9	378.3	378.8	379.3	379.7	380.2	380.6	380.9	381.6
85	395.9	396.4	396.8	397.3	397.7	398.2	398.6	399.1	399.5	400.0	400.4	400.9	401.4	401.8	402.3	402.8	403.3	403.7	404.2	404.6	404.9	405.5
90	419.9	420.4	420.8	421.3	421.7	422.2	422.6	423.1	423.5	424.0	424.4	424.9	425.3	425.8	426.2	426.7	427.2	427.7	428.2	428.6	428.8	429.5
95	443.9	444.4	444.8	445.3	445.7	446.2	446.6	447.1	447.5	448.0	448.4	448.9	449.3	449.8	450.2	450.7	451.2	451.6	452.1	452.5	452.8	453.4
100	467.8	468.3	468.7	469.2	469.6	470.1	470.5	471.0	471.4	471.9	472.4	472.9	473.3	473.8	474.2	474.7	475.2	475.6	476.1	476.5	476.7	477.4
105	491.8	492.3	492.7	493.2	493.6	494.1	494.5	495.0	495.4	495.9	496.3	496.8	497.2	497.7	498.1	498.6	499.1	499.5	500.0	500.4	500.7	501.3
110	515.8	516.3	516.7	517.2	517.6	518.1	518.5	519.0	519.4	519.9	520.3	520.8	521.2	521.7	522.1	522.6	523.1	523.5	524.0	524.4	524.6	525.3

나. 등가전온도사이클수에 대한 누적손상도 계산

1) E아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range	mean	Sint	Salt	n_0	n	N	UF
[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]				
110	85	523.1	261.5		507	5.00E+03	1.01E-01
						CUF	1.01E-01

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range	mean	Sint	Salt	n_0	n	N	UF
[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]				
110	45	519.4	259.7		79	5.11E+03	1.55E-02
						CUF	1.55E-02

2) F아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range	mean	Sint	Salt	n_0	n	N	UF
[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]				
110	75	522.1	261.1		277	5.03E+03	5.51E-02
						CUF	5.51E-02

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient	type	Item					
range	mean	Sint	Salt	n_0	n	N	UF
[°C]	[°C]	[MPa]	[MPa]				
110	45	519.4	259.7		8	5.11E+03	1.57E-03
						CUF	1.57E-03

3) G아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
110	95	524.0	262.0		156	4.97E+03	3.14E-02
						CUF	3.14E-02

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
110	35	518.5	259.3		2	5.13E+03	3.90E-04
						CUF	3.90E-04

4) H아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
110	110	525.3	262.7		16	4.94E+03	3.24E-03
						CUF	3.24E-03

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [°C]	mean [°C]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n_0	n	N	UF
110	40	519.0	259.5		6	5.12E+03	1.17E-03
						CUF	1.17E-03

5) I아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	90	523.5	261.8		309	4.99E+03	6.20E-02
						CUF	6.20E-02

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	50	519.9	260.0		190	5.09E+03	3.73E-02
						CUF	3.73E-02

6) J아파트

공급관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	75	522.1	261.1		129	5.03E+03	2.57E-02

회수관

Equivalent full temperature cycle							
transient type		Item					
range [℃]	mean [℃]	Sint [MPa]	Salt [MPa]	n ₀	n	N	UF
110	40	519.0	259.5		4	5.12E+03	7.81E-04
						CUF	7.81E-04